

地形图辅助的建筑物地面和机载点云特征配准

吴杭彬^{1,2}, 李晗嫣¹, 刘 春^{1,2}, 姚连璧^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092)

摘要: 机载和地面激光扫描数据配准的实质是坐标转换问题. 以建筑物的立面为研究对象, 基于地形图的建筑物线性特征, 提出建筑物线-面特征约束的地面和机载点云数据配准方法, 实现机载和地面点云数据的配准及其向地形图坐标系的转换. 采用拟合方法, 获取地面与机载点云、地形图的建筑物线性特征参数. 依据特征之间的空间关系, 建立特征参数与坐标转换模型的关系, 分别实现地面与机载点云向地形图坐标系的水平转换. 垂直转换则通过建筑物水平屋顶边缘的高程相对配准以及控制点处的高程绝对配准计算. 以上海洋水族馆点云为例进行实验验证, 结果表明该方法可以实现地面和机载点云数据配准.

关键词: 地形图; 建筑物特征; 点云; 配准

中图分类号: P237.3

文献标志码: A

Feature-based Registration Between Terrestrial and Airborne Point Cloud Assisted by Topographic Maps

WU Hangbin^{1,2}, LI Hanyan¹, LIU Chun^{1,2}, YAO Lianbi^{1,2}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying of NASMG, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Coordinate transformation is the essence of registration between airborne and terrestrial LiDAR system. The traditional coordinate transformation needs to obtain several common points and calculate the model parameters by those points. However, common points are hard to select in terrestrial and airborne point cloud due to different platforms and discrete sample mode. Taking building profile features as objects, a features constraint registration method was proposed in this paper to achieve the registration between point clouds and topographic maps. First, the feature-line and feature-plane of building facades were obtained from airborne and terrestrial point cloud separately. After being projected to the horizontal, the plane transformational parameters were

calculated according to the relationship between model parameters and feature parameters. Next, the vertical parameter were computed by slicing the top layer of point cloud and elevation of the control points. Finally, the method was verified by a case study in Shanghai Ocean Aquarium.

Key words: topographic maps; building features; point cloud; registration

机载激光扫描技术 (airborne laser scanning, ALS) 和地面激光扫描技术 (terrestrial laser scanning, TLS) 已经成为三维城市模型建设的重要数据来源^[1]. 由于地物遮挡、平台限制等原因, 两种技术都无法独立完成建筑物的完整扫描, 只能分别扫到建筑物的侧面或顶部, 因而观测范围有很强的互补性^[2]. 然而, 两种技术基于不同的传感器, 坐标框架并不一致, 因此, 集成两种技术的关键是点云配准.

点云配准方法可分为基于点云自身的配准和基于特征基元的配准^[3]. 基于点云自身的配准是指直接从点云自身出发, 寻求点集与点集的配准关系, 其中最为典型的算法为 ICP (iterative closest point) 算法^[4-6]. 基于特征基元的配准方法是从点云中提取点、线、面特征进行配准, 这些特征通常是指建筑角点、轮廓、屋顶面片、线状道路等. 如彭博^[7]、Habib 等^[8]、马洪超等^[9]、姚春静^[10]、Zhao 等^[11] 分别提出了基于曲率图、线特征、DSM (digital surface model) 特征的配准算法.

点云配准的本质是坐标转换, 基本内容包括: 配准基元选择、相似性测度、变换函数和匹配策略^[9]. 由于机载和地面激光扫描技术的采集平台、数据分辨率等差异, 在机载和地面点云数据中, 很难找到同名的三维激光点作为配准基元, 用于坐标转换模型

收稿日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41101382, 41371333); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2013AA12A206); 测绘地理信息公益性行业科研专项(HY14122136)

第一作者: 吴杭彬(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为激光扫描数据处理理论与方法. E-mail: hb@tongji.edu.cn

(如布尔沙模型、刚体转换模型等)参数计算,从而导致变换函数的参数确定存在困难,这也是机载点云与地面点云配准的难点所在。

地形图是最常用的测绘成果,具有精度高、坐标系通用等优点,因此将点云数据转换到地形图坐标系是重要的点云预处理过程。以建筑线性特征为配准基元,在地形图辅助下,提出一套线性特征约束的点云与地形图配准方法。基于同一建筑物特征在不同平台数据中的对应关系,建立了轮廓线特征参数与数据转换模型之间的约束关系,分别实现平面和高程转换参数的计算。采用上海海洋水族馆采集的地面和机载激光扫描数据,构建了10套建筑侧面特征进行坐标配准。配准结果表明,本文方法可以用于激光扫描数据与地形图的配准过程。

1 点云数据特征配准方法

1.1 配准模型

三维刚体坐标转换模型常用于激光扫描数据配准^[12]。根据该模型,坐标系 $oxyz$ 变换到坐标系 $OXYZ$ 的数学模型如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: α, β, γ 分别为绕 Z 轴、 Y 轴和 X 轴的旋转量; $\mathbf{R}$ 为由 α, β, γ 确定的旋转矩阵; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 X, Y 和 Z 方向上的平移量。

ALS系统输出的点云一般基于投影面为大地水准面或似大地水准面的坐标系,因此点云数据高程方向垂直于大地水准面或似大地水准面。地面LiDAR系统采集数据时,仪器一般需要进行严格整平,数据的高程方向也垂直于大地水准面。两套数据的高程指向一致,即坐标系 Z 方向平行。同样,地形图一般以某一水准面进行高斯投影得到,其高程方向也垂直于大地水准面。考虑到以上坐标系的关系,在本文研究中,只考虑一个平面旋转参数和三个平移参数,简化后的配准模型如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{TM}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{LS}} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $(X, Y, Z)_{\text{TM}}$ 为地形图坐标; $(X, Y, Z)_{\text{LS}}$ 为激光扫描坐标。然而,一般的地形图只有平面的特征数据,很少具备地物(如建筑物)在高程方向的特征,直

接应用同名点进行配准存在困难。因此,本文选用建筑物的线性特征进行配准。

1.2 建筑物特征参数提取

为表述方便,对后续用到的建筑物特征参数作统一定义: k, b 分别为一般意义的平面直线斜率与截距参数; $K_{\text{LS}}, B_{\text{LS}}$ 分别为激光扫描点云获取的建筑物边缘直线特征参数; $K_{\text{A}}, B_{\text{A}}$ 分别为机载点云获取的建筑物边缘直线特征参数; $K_{\text{T}}, B_{\text{T}}$ 分别为地面点云获取的建筑物边缘直线特征参数; $K_{\text{TM}}, B_{\text{TM}}$ 分别为地形图中点云的建筑物直线特征参数。

1.2.1 机载点云建筑物特征线提取及修正

机载 LiDAR 特征线提取分为两步,即初始特征提取与特征方程修正。

(1) 机载建筑物直线边缘初始特征提取

机载 LiDAR 数据的边缘特征是三维的直线,在下文的配准模型中,主要在二维尺度上进行特征约束实现平面转换参数计算。因此,为计算方便,首先将建筑机载 LiDAR 数据投影到水平面,然后采用 Canny 算子^[13]提取边缘点集,并基于边缘点集拟合直线方程(见图1中虚线),得到直线方程 $Y = kX + b$ 。

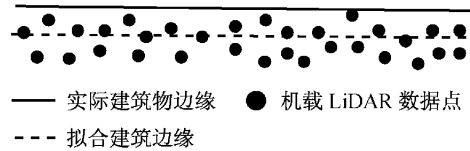


图1 机载 LiDAR 特征线初始提取

Fig.1 Feature line extraction from airborne LiDAR data

(2) 特征方程修正

机载激光扫描为离散扫描, Canny 算子提取的边缘点集并不能准确代表建筑物的实际边缘(如图1),因此特征方程与实际边缘存在一定的差异。本文采用的修正方法是根据已经提取的建筑物特征线,往外侧平移距离 d (图2)。 d 是拟合直线的边缘点集中,最外侧的点到拟合直线的距离。 d 值的确定通过下面两步骤完成:①初步拟合的直线将激光点分为外侧和内侧两部分,点到直线距离的正负性可以用于判定外侧和内侧部分;②在外侧点中,选择点到拟

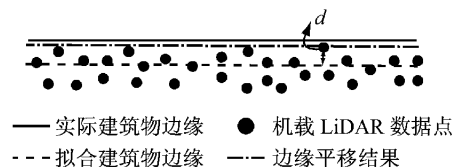


图2 机载 LiDAR 特征线方程修正

Fig.2 Parameter improvement of feature line

合直线距离绝对值最大的点,该点即为最外侧点,从而确定 d 值.

令平移后的截距为 B_A 、斜率为 K_A ,则有

$$B_A = b + d/\cos \varphi$$

$$K_A = k = \tan \varphi$$

其中, φ 为拟合特征线与 X 轴的夹角.

1.2.2 地面点云建筑物特征面提取及简化

地面点云集中在建筑物立面,选择立面点集求解特征参数,采用激光点到拟合面的距离作为评价因素,剔除距离过大的点,迭代直到误差满足要求,得到平面方程 $P_1X + P_2Y + P_3Z = 1$. 其中 P_1, P_2 和 P_3 均为平面方程参数.

机载激光扫描获取的直线特征为二维方程,地面激光扫描数据获取的立面特征为三维方程,两者对应实地的同一地物,且与高程方向无关. 因此,为后述模型描述简便,将地面激光扫描拟合的平面特征方程也向水平面投影(即假设 $Z=0$),从而将平面方程退化为直线特征方程. 得到直线方程 $Y = K_T X + B_T$,如图 3 所示.

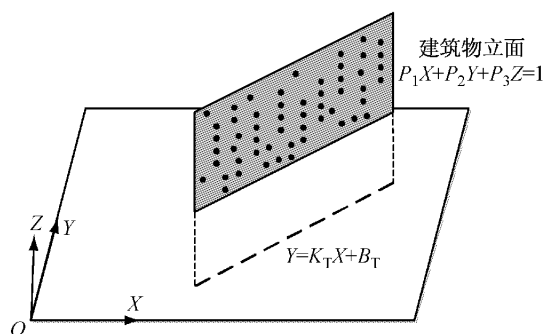


图 3 建筑物立面向水平面投影

Fig.3 Projection of building façade

1.2.3 地形图建筑物边缘特征参数提取

地形图的建筑物线性特征的斜率(K_{TM})和截距(B_{TM})参数通过对数字地形图中的建筑物线性特征端点进行坐标量测,然后根据斜率和截距公式计算得到.

1.3 水平及垂直配准参数计算方法

地形图成果的坐标系一般是一个地区最常用的坐标系. 因此本文以地形图坐标系作为目标坐标系,分别将机载和地面点云数据经坐标转换后,转换至该坐标系下. 根据式(2),分别实现水平与垂直方向的参数计算,其他模型(如七参数 Bursa 模型)的水平配准参数计算过程与刚体变换模型类似.

1.3.1 水平配准参数计算

激光扫描获取的特征线和地形图获取的特征线

对应实际同一地物,因此两套不同坐标系下的直线方程参数与模型的转换参数之间应该存在一定的关系.

如图 4 所示,坐标系 LS 代表激光扫描系统获取的坐标系, TM 代表地形图的坐标系. LS 坐标系下的直线 L_1 ,与 TM 坐标系下的直线 L_2 是对应的特征线. 令 L_1 上的任意两点 i 和 j 的坐标分别为 $(X_{i,LS}, Y_{i,LS})$ 与 $(X_{j,LS}, Y_{j,LS})$,则直线 L_2 上的对应两点(I 和 J)的坐标分别为 $(X_{I,TM}, Y_{I,TM})$ 与 $(X_{J,TM}, Y_{J,TM})$.

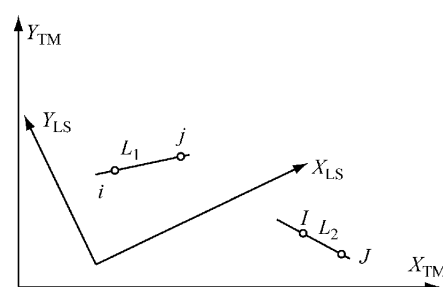


图 4 地面与机载坐标系的特征线

Fig.4 Feature line of terrestrial and airborne coordinate system

$K_{ij,LS}$ 与 $B_{ij,LS}$ 为 LS 坐标系下 L_1 的斜率与截距. 将 i, j 两点按式(2)进行转换,得到 TM 坐标系下的坐标

$$\begin{cases} X_{I,TM} = X_{i,LS} \cos \alpha + Y_{i,LS} \sin \alpha + \Delta x \\ Y_{I,TM} = -X_{i,LS} \sin \alpha + Y_{i,LS} \cos \alpha + \Delta y \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X_{J,TM} = X_{j,LS} \cos \alpha + Y_{j,LS} \sin \alpha + \Delta x \\ Y_{J,TM} = -X_{j,LS} \sin \alpha + Y_{j,LS} \cos \alpha + \Delta y \end{cases} \quad (4)$$

TM 坐标系下 L_2 斜率可用下式计算:

$$K_{IJ,TM} = \frac{Y_{J,TM} - Y_{I,TM}}{X_{J,TM} - X_{I,TM}} \quad (5)$$

将式(3),(4)代入式(5)并化简得

$$K_{IJ,TM} = \frac{-(X_{j,LS} - X_{i,LS}) \sin \alpha + (Y_{j,LS} - Y_{i,LS}) \cos \alpha}{(X_{j,LS} - X_{i,LS}) \cos \alpha + (Y_{j,LS} - Y_{i,LS}) \sin \alpha} \quad (6)$$

由于在 LS 坐标系下,点 i 与 j 满足

$$\begin{cases} Y_{i,LS} = K_{ij,LS} X_{i,LS} + B_{ij,LS} \\ Y_{j,LS} = K_{ij,LS} X_{j,LS} + B_{ij,LS} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),整理后得

$$K_{IJ,TM} = \frac{-\tan \alpha + K_{ij,LS}}{1 + K_{ij,LS} \tan \alpha} \quad (8)$$

从式(8)可看出,斜率的变换只与转换模型中的旋转角有关. 类似地,可以推导出截距参数的约束条件

$$B_{IJ,TM} = [B_{ij,LS} + \Delta y (\cos \alpha + K_{ij,LS} \sin \alpha) +$$

$$\frac{\Delta x(\sin \alpha - K_{ij,LS} \cos \alpha)}{(\cos \alpha + K_{ij,LS} \sin \alpha)^{-1}} \quad (9)$$

式(8)和(9)建立了建筑物同一侧面特征在不同坐标系下的特征参数(斜率、截距)与坐标转换模型参数($\alpha, \Delta x, \Delta y$)之间的平面约束关系. 本文提取的特征方程参数,理论上应当满足式(8)和(9),因此只需获取两套同名线性特征即可求解三个转换参数. 当存在多余观测时,求解转换参数的过程可以采用拟合方法或附有参数的条件平差方法,具体公式推导过程不再介绍. 考虑到计算简便性,在本文研究中采用了拟合方法计算参数.

1.3.2 高程配准参数计算

上文的平面参数计算方法可以在地形图协助下计算参数($\alpha, \Delta x, \Delta y$). 然而地形图中一般只存储周围控制点的高程信息,极少存储建筑物的高程信息,因此难以计算 Δz 参数. 因此,本文采用两步法实现高程参数的计算:地面和机载点云高程相对配准,点云高程与控制点高程配准.

(1) 地面和机载点云高程相对配准

高程相对配准通过同名水平屋顶边缘的高差计算完成. 如图5所示,圆点代表机载激光扫描获取的点云,五角星代表地面激光扫描获取的建筑物侧面点云. 粗线则代表水平屋顶边缘.

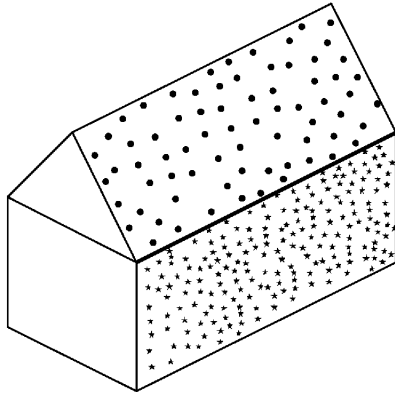


图5 水平屋顶边缘提取

Fig.5 Extraction of flat roof edge from terrestrial and airborne point cloud

将机载 LiDAR 数据中用于拟合建筑水平顶部边缘特征的点集(图5中圆点)进行高程平均,得到

$$\bar{Z}_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{i,A} \quad (10)$$

其中: $Z_{i,A}$ 为机载激光点高程值; n 为参与拟合的机载激光点个数.

同样,选取对应的地面 LiDAR 数据的顶部切片点集(图5中五角星)的高程均值为地面高程 $\bar{Z}_T$

$$\bar{Z}_T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{i,T} \quad (11)$$

其中: $Z_{i,T}$ 为地面激光点高程值; m 为参与拟合的地面激光点个数.

相对高程参数 ΔZ 可以通过下式计算:

$$\Delta Z = \bar{Z}_A - \bar{Z}_T \quad (12)$$

(2) 点云高程与控制点高程配准

相对配准后的地面与机载点云数据可以实现高程方向的统一,然而与地形图的高程还存在一定差异,还需实现绝对高程配准. 其过程较为简单,在地形图中,找到高程控制点并获取高程信息 Z_{con} ,同样在已经实现平面配准的点云数据中,找到同名点获取高程 Z_{LS} ,相减后得到点云数据向地形图转换的高程参数 Δz :

$$\Delta z = Z_{con} - Z_{LS} \quad (13)$$

1.4 地形图辅助的建筑物点云配准计算流程

根据以上介绍,本文的配准计算流程分为水平配准和垂直配准两部分,分别见图6和图7.

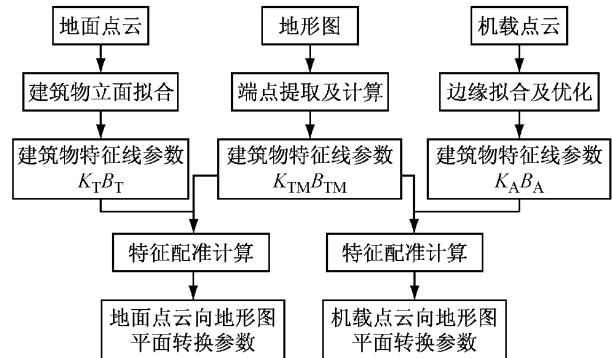


图6 地形图辅助的机载和地面点云水平配准流程

Fig.6 Flowchart of horizontal registration between terrestrial and airborne point cloud assisted by topographic maps

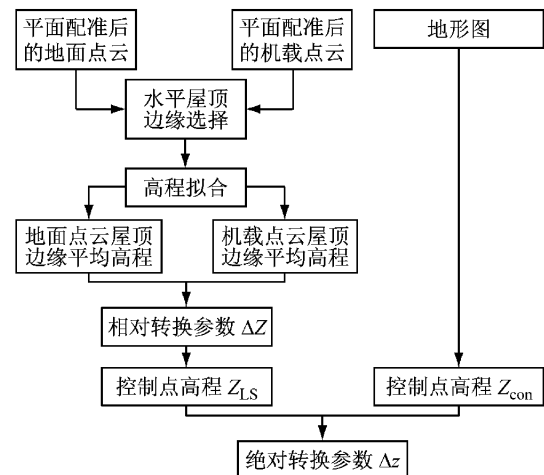


图7 垂直配准参数计算流程

Fig.7 Flowchart of vertical parameter calculation

2 实例分析

2.1 实验区域及数据

选用上海市海洋水族馆(包括主楼和裙楼)数据进行试验分析. 其中,地面激光扫描数据由 FARO Focus3D 仪器于 2013 年 12 月底扫描获得,共设置 14 站进行扫描,经配准、裁剪、压缩等预处理,包含 381 658 点,平均分辨率为 0.11 m. 机载激光扫描数据由 Optech ALTM 3100 系统于 2006 年采集,包含 37 901 点,平均分辨率为 0.16 m. 数据如图 8 所示. 由于地处上海,因此本文研究以上海市城建坐标系为目标系,将地面和机载点云数据转换至该坐标系并实现配准.

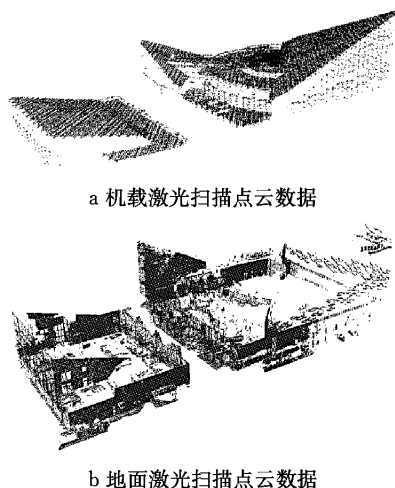


图 8 实验数据

Fig.8 Case point cloud

2.2 建筑物特征参数提取

根据实验对象线性特征分布,在地形图中提取 10 套线性参数用于后续的配准计算,其特征分布如图 9 所示(图中数字表示特征线编号).

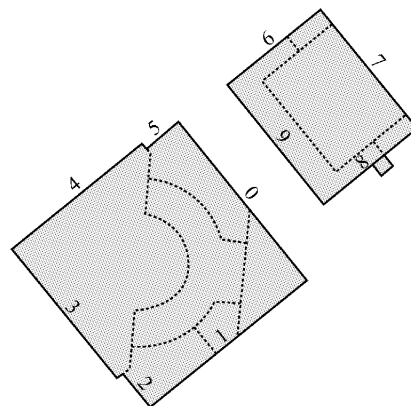


图 9 实验区地形图及其特征线的分布

Fig.9 Topographic map and distribution of feature lines

根据线性特征分布,分别在激光扫描点云中进行特征提取和参数计算,其结果见表 1. 3 号、4 号特征因过于靠近围墙,地面点云数据极少而未进行 K_T, B_T 参数计算;0 号、3 号和 5 号特征因机载激光点过少,未计算 K_A, B_A 参数.

2.3 特征配准参数计算

2.3.1 水平配准参数计算

将表 1 中的特征参数应用于本文水平参数计算方法,得到地面点云向地形图配准的水平转换参数和机载点云向地形图配准的水平转换参数见表 2.

2.3.2 垂直配准参数计算

以上 10 组特征中,选取屋顶边缘水平的 4 组特

表 1 线性特征的参数

Tab.1 Parameters of feature lines

特征 编号	地形图		机载激光扫描		地面激光扫描	
	K_{TM}	B_{TM}	K_A	B_A	K_T	B_T
0	-1.237 3	4 398.63	—	—	0.321 9	-64.99
1	0.807 6	-1 557.42	0.807 4	-1 552.30	-3.191 2	-18.40
2	-1.242 3	4 311.63	-1.224 3	4 366.93	0.286 8	-132.65
3	-1.235 0	4 286.81	—	—	—	—
4	0.810 1	-1 479.51	0.806 5	-1 466.93	—	—
5	0.810 0	-1 482.12	—	—	-3.157 9	-237.41
6	0.806 6	-1 472.87	0.801 0	-1 460.79	-3.119 3	-234.06
7	-1.236 7	4 487.75	-1.238 5	4 494.97	0.321 6	-6.21
8	0.810 0	-1 544.92	0.804 7	-1 648.65	-3.119 2	-75.85
9	-1.237 5	4 429.66	-1.303 9	4 430.90	0.319 6	-47.01

表 2 实验数据的水平配准参数

Tab.2 Horizontal matching parameters

地形图	参数		
	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	α/rad
地面点云向地形图	2 947.15	828.74	-1.937 896 0
机载点云向地形图	1.44	1.03	-0.000 428 7

征进行垂直方向配准,经过水平边缘特征的高程拟合计算,得到相对高程转换参数见表 3.

在实验区周围找到相邻的 7 个控制点 A~G,并记录其高程信息(吴淞高程系),然后与点云中相同位置的激光点高程比较,得到高程绝对转换参数,实

现两类点云与地形图高程坐标系的统一. 实验数据的绝对垂直配准参数见表 4.

表 3 实验数据的相对垂直配准参数

Tab.3 Parameters of relative vertical matching m

特征编号	$\bar{Z}_A$	$\bar{Z}_T$	ΔZ
5	11.48	6.77	4.71
6	11.30	6.60	4.70
7	21.45	16.76	4.69
8	11.36	6.62	4.74
平均			4.71

2.4 配准结果评估

在海洋水族馆人工选取 5 对建筑物屋顶拐角的激光点 JH1~JH5, 进行坐标差异分析以评估配准精度. 5 对激光点的坐标差异见表 5.

表 4 实验数据的绝对垂直配准参数

Tab.4 Vertical matching parameter calculation m

编号	Z_{con}	Z_{LS}	Δz
A	3.74	3.71	0.03
B	3.87	3.83	0.04
C	4.02	3.94	0.08
D	4.30	4.25	0.05
E	3.97	3.90	0.07
F	3.69	3.67	0.02
G	3.66	3.61	0.05
平均			0.049

表 5 5 对激光点的坐标差异

Tab.5 Coordinate difference of 5 pairs of checkpoints m

序号	X 方向	Y 方向	Z 方向
JH1	-0.200	-0.193	0.079
JH2	0.361	-0.381	-0.013
JH3	0.627	-0.323	-0.195
JH4	-0.263	-0.056	-0.283
JH5	-0.457	0.468	0.063
标准误差	0.458	0.339	0.161

从表 5 可以看出, 其 X 方向的精度约为 0.46 m, Y 方向的精度约为 0.34 m, Z 方向的精度约为 0.16 m. 激光扫描为离散扫描, 因此选取的 5 对三维激光点只能作为近似检核点, 其坐标差异除了受配准模型影响外, 还受到点云的分辨率, 尤其是选取的激光点对附近的点云分辨率影响. 而本文选取的 5 对激光点位于海洋水族馆的屋顶拐角处, 机载点云较稀疏. 因此评估得到的精度结果并不高. 事实上这也是不能用传统方法获取同名点进行数据配准的原因.

2.5 配准点云三维可视化结果

将本文提取的水平和垂直配准参数应用于地面激光扫描数据和机载激光扫描数据, 得到两套数据在地形图坐标系下的坐标数据. 图 10 给出了三维可视化结果. 对比图 8 和图 10 可以发现, 两类数据在

屋顶边缘、转角处已经实现匹配.

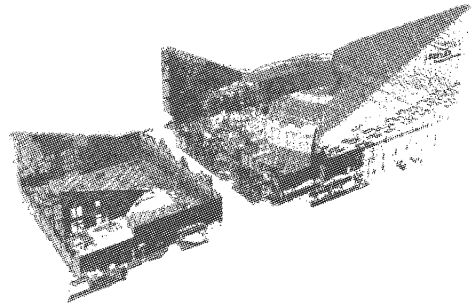


图 10 实验数据配准结果可视化

Fig.10 Visualization of registered point cloud

3 结语

地面激光扫描和机载激光扫描数据是数字城市建设的重要数据, 目前融合两类数据进行建筑物建模的主要难点在于数据的配准. 本文基于建筑物的直线与平面特征, 在地形图的辅助下, 提出一种建筑物线-面特征约束的点云数据配准方法, 将机载激光扫描数据获取的建筑物边缘特征与地面激光扫描数据获取的平面特征, 投影到某一水平面, 分别与地形图的线性特征进行配准, 建立特征方程参数与转换模型之间的约束关系, 推导并给出了线面特征约束下的计算模型与方法. 同时, 高程方向的配准采用水平屋顶边缘的高程平均值之差进行计算. 采用上海市海洋水族馆的数据进行实验, 表明本文方法可以实现两类数据的坐标配准.

在本文的配准方法中, 还存在一些不足之处, 如实际机载激光扫描数据与地面激光扫描数据的 Z 轴未必平行, 从而不能简化刚体变换模型的两个角度. 同时, 屋顶的形状也会影响本文方法的应用, 如有屋檐的建筑物, 其地面激光扫描建立的立面和地形图的特征边缘线往往无法对应. 因此, 如何考虑 Z 轴不平行情况、屋顶的形状等问题是需要进一步研究的方向.

致谢 感谢上海市测绘院为本文研究提供了机载激光扫描数据和地形图数据.

参考文献:

- [1] Brenner C. Building reconstruction from images and laser scanning [J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2005, 6(3/4): 187.

(下转第 482 页)