

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **2**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年2月 第17卷 第2期(总第190期)

目 次

综述

内容感知图像缩放技术综述 施美玲,徐丹(157)

图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 潘林,魏丽芳,郑炳锜,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的3维物体识别 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 王丽英,宋伟东(279)

计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 2 期

2012 年 2 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101

电子信箱: jig@irsa.ac.cn

电话: 010-68407995 010-82614429

网 址: www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail: jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

Contents

Review

Survey on content-aware image resizing techniques Shi Meiling, Xu Dan (157)

Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data Wang Liying, Song Weidong (279)

Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图法分类号: P237 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0279-07

论文引用格式: 王丽英, 宋伟东. 机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 279-285

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差

王丽英, 宋伟东

辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000

摘要: 系统误差是影响机载 LiDAR 系统精度的主要因素, 因而消除或削弱系统误差影响、提高数据精度具有重要理论意义和工程实用价值。提出基于最小高程差(LZD)的机载 LiDAR 航带平差方法, 并通过引入高斯-马尔柯夫模型提高了平差精度。实验部分考察了引入高斯-马尔柯夫模型的必要性及算法精度。实验结果表明: 引入高斯-马尔柯夫模型可有效地提高算法精度; 使用 LZD 进行机载 LiDAR 航带平差获取的结果均可以满足工程生产的精度需求; 与商业软件 TerraMatch 相比, LZD 的精度和 TerraMatch 的精度相当。

关键词: 激光雷达; 航带平差; 最小高程差; 高斯-马尔柯夫模型

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data

Wang Liying, Song Weidong

School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: Systematic errors are the main factors affecting the accuracy of airborne LiDAR system. To attain high-precision airborne LiDAR data, it is of great theoretic and practical value to research the key techniques and methods to eliminate these systematic errors. In our paper we propose a new method for airborne LiDAR strip adjustment based on least Z-difference(LZD) algorithm and then introduce the Gauss-Markov model to improve the adjustment accuracy. Experimental results show that after reasonable parameters configuration of the Gauss-Markov model, our improved strip adjustment method can significantly improve the adjustment accuracy. The accuracy of airborne LiDAR data strip adjustment based on LZD can meet our project accuracy requirements. Compared to the commercial software TerraMatch, the LZD and TerraMatch accuracy are at the same level.

Key words: LiDAR; strip adjustment; least Z-difference; Gauss-Markov model

0 引言

机载激光雷达(LiDAR)系统集成了多个子系统, 其定位精度会受到来自姿态、测距、GPS 定位、系统集成等多种误差的影响。研究^[1-4]发现: 这些子系统量测、系统集成误差对激光脚点定位结果的影响呈现出系统性。系统误差的存在不仅影响点云的 3 维坐标的绝对精度, 更重要的是系统误差导致不同航带的同

名特征间存在 3 维空间偏移(图 1), 这严重影响点云数据的相对精度及后续的数据处理, 如采用存在



图 1 航带重叠区域同名特征的系统性偏移

Fig. 1 Strip discrepancies observed from four strips

收稿日期: 2011-01-07; 修回日期: 2011-06-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40771159); 辽宁省科学技术厅社会发展攻关计划项目(2007308003)

第一作者简介: 王丽英(1982—), 女, 讲师, 辽宁工程技术大学地图制图学与地理信息工程专业博士, 主要研究方向为 LiDAR 基础理论与应用研究。E-mail: wangliyintu@163.com

明显相对偏移的多航带数据进行3维城市建模则可能导致建模错误甚至失败。因此要获取大范围、精度一致的空间信息必须保证消除不同航带间的空间偏移。

航带平差是目前较常见的消除系统误差的方式。航带平差的目的^[5]在于通过消除航带重叠区域之间的系统性偏移从而生成无缝产品,为最终地理空间产品提供质量保证和质量控制。一些早期的航带平差方法只是针对航带重叠区域高程方向的偏移,被称做1D航带平差^[6-7]。Vosselman等人^[8]指出LiDAR数据的平面系统误差比高程系统误差更显著,因而必须运用3D航带平差方案来消除航带重叠区域水平、高程方向的偏移。初始的3D航带平差只是通过给定的转换模型最小化航带间的差异,被称做“数据驱动航带平差^[9]”。而基于传感器检校的航带平差^[10-12]采用可能造成系统误差的物理变量为参数,基于几何定位方程建立误差模型,用航带重叠区域同名特征间的偏移应该为零作为已知条件来进行平差解算。其考虑了机载LiDAR几何定位过程,理论上比较严密,但是建立的误差模型存在参数间相关性强的问题,因此实际应用中为了保证参数解算的精度和可靠性,往往会简化误差方程模型,导致平差后还存在未知的残余误差。此外,由于LiDAR系统的保密性,目前用户得到的大多数都是3维坐标数据,而不是原始的观测值,这也给传感器检校航带平差的使用带来了困难。而数据驱动航带平差虽然不需要原始观测值,但它没有考虑机载LiDAR的传感器模型,理论上并不严密。

航带间系统性偏移的消除意味着航带数据之间的重合,而航带数据之间的重合可以看做是一个配准或匹配问题。因此,提出借助表面匹配技术完成机载LiDAR航带平差。而表面匹配算法中最有代表性的就是最小高程差(LZD)算法^[13],其通过最小化所有对应点间的高差的平方和来求解表面转换参数。基于LZD算法实现了LiDAR数据航带平差,并将高斯-马尔柯夫模型^[14]引入其中以提高平差精度。

1 LZD 匹配算法

1.1 匹配原理

算法基本思想:先以两表面平面坐标相同的点为对应点(如果不存在对应点就内插一个临时点),然后利用对应点之间的Z坐标差的平方和最小原则来建立目标方程,最后根据最小二乘原理来求解

转换参数向量,这组参数能够拉近两个表面。反复迭代上述过程,就可以正确完成匹配。

假设两匹配表面分别为 $Z=f(X,Y)$ (参考面)与 $z=f(x,y)$ (待匹配面),两表面的对应点记为 $P=[X\ Y\ Z]^T$ 与 $P'=[x\ y\ z]^T$,对应的数学关系转换式:

$$P = T + sR \cdot P' \quad (1)$$

式中, $T=[T_x\ T_y\ T_z]^T$ 为 P' 沿X轴、Y轴、Z轴相对 P 的平移参数; S 为缩放系数; R 为由3个旋转参数($R_x=\omega, R_y=\varphi, R_z=\kappa$)构成的旋转矩阵。在 $\omega=0, \varphi=0, \kappa=0, s=1$ 处,对式(1)按泰勒级数展开并略去二次以上高次项:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} + \bar{s} \bar{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & \Delta s & -\Delta\omega \\ -\Delta\varphi & \Delta\omega & \Delta s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

建立对应点时,取

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} + \bar{s} \bar{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此,由式(2)(3)可得

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta T_x + x\Delta s - y\Delta\kappa + z\Delta\varphi \\ \Delta Y &= \Delta T_y + x\Delta\kappa + y\Delta s - z\Delta\omega \\ \Delta Z &= \Delta T_z - x\Delta\varphi + y\Delta\omega + z\Delta s \end{aligned} \quad (4)$$

若LiDAR数据表达方式采用不规则三角网,则TIN表面任意一点的高程可表示成: $Z=f_z(X,Y)$,假设X、Y方向的高程梯度存在且连续,则

$$\Delta Z = \frac{df}{dx}\Delta X + \frac{df}{dy}\Delta Y \quad (5)$$

式中的一阶偏导数可以如下求解:对参考面构建TIN,不妨记参考面任意三角剖面方程为 $ax+by+cz-d=0$,则

$$z = \frac{(d-ax-by)}{c} \quad (6)$$

$$\frac{df}{dx} = -\frac{a}{c} \quad \frac{df}{dy} = -\frac{b}{c} \quad (7)$$

用式(4)中第3式减去式(5),可得:

$$\begin{aligned} \lambda &= \Delta T_z - x\Delta\varphi + y\Delta\omega + z\Delta s - \\ &\frac{df}{dx}(\Delta T_x + x\Delta s - y\Delta\kappa + z\Delta\varphi) - \\ &\frac{df}{dy}(\Delta T_y + x\Delta\kappa + y\Delta s - z\Delta\omega) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, λ 为两个表面对应坐标相同点的高程差, 然后依据最小二乘法则求解 $\min \sum P_i(\lambda_i)^2$ 。其过程是个不断迭代的收敛过程。 P_i 表示待匹配表面的各个点的权, 如果在参考表面中找到对应点, 则为 1, 否则为 0。

式(8)矩阵形式为

$$V = A X + \lambda, P \quad (9)$$

式中, V 为残差向量, A 为系数矩阵, $A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T_z} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T_y} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T_x} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta \kappa} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta \varphi} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta \omega} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta s} \end{bmatrix}$, $X^T = [\Delta T_z \ \Delta T_y \ \Delta T_x \ \Delta \kappa \ \Delta \varphi \ \Delta \omega \ \Delta s]$ 为估算参数改正向量; λ 为两表面间同名特征间的 Z 坐标差; P 为权阵, 其确定见 2.3 节。

1.2 高斯-马尔柯夫模型的引入

若平差计算中同时考虑统计学理论, 视观测量为随机变量, 引入高斯-马尔柯夫模型。将未知转换参数都视为基于适当的先验权计算得出的随机量, 进而达到对估算参数进行控制的目的。基于这种考虑引入另外一个系统参数的观测方程:

$$V_b = I X + dZ_b, P_b \quad (10)$$

式中, I 为单位矩阵, dZ_b 为假设的系统七参数观测向量, P_b 为相应的先验权系数矩阵。当 $(P_b)_{ii} \rightarrow \infty$ 表示第 i 个参数看做是常量, 而当 $(P_b)_{ii} = 0$ 表示第 i 个参数可以任意变化。

联合式(9)(11)根据最小二乘原理可以得到未知参数的最小无偏方差估计:

$$\hat{X} = -(A^T P A + P_b)^{-1} (A^T P L + P_b L_b) \quad (11)$$

2 算法结构

2.1 算法流程

算法流程如图 2 所示。具体说明如下:

1) 初始转换参数求解 首先在参考面 S_1 基于点特征提取算子提取特征点, 然后在以特征点为中心的一定邻域范围内移动待匹配面 S_2 , 计算二者的相关系数, 相关系数最大且大于 0.99 即认为搜索到一个最佳的概略匹配位置。旋转参数初始值取 0。比例因子初始值取 1。

2) 对 S_1 构建 TIN, 并保存三角网。

3) 对 S_2 中所有点逐一搜索其在 S_1 中对应面片 (见 2.2 节)。如果没有找到对应闭合三角形, 则继续 S_2 中下一点的搜索; 如果找到对应闭合三角形,

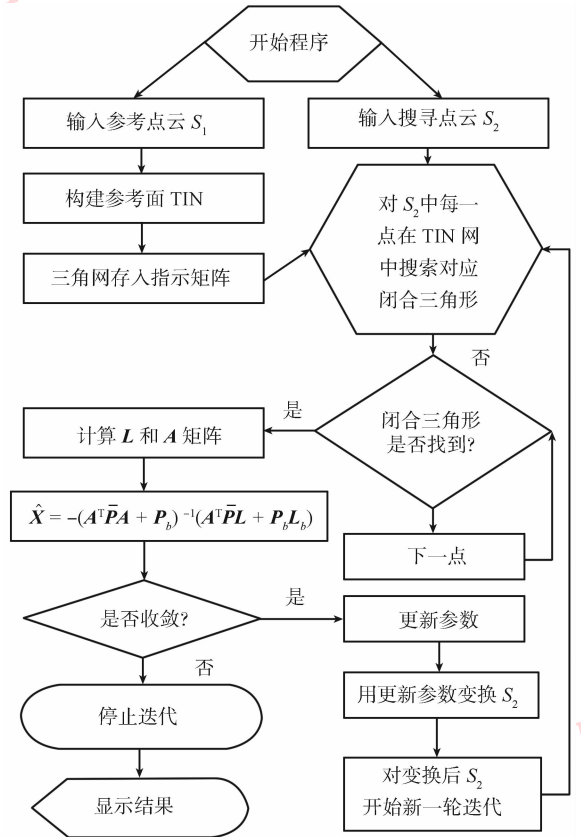


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm

则转入下一步。

4) 构建系数矩阵 A 和常数项 L 。

5) 依据式(11)对误差方程进行解算, 获取转换参数的改正数 \hat{X} 。

6) 根据迭代终止条件 (见 2.4 节) 判断迭代是否收敛。如果不满足迭代收敛条件, 更新转换参数, 并用转换参数对 S_2 进行变换, 最后转入步骤 3); 如果满足迭代收敛条件, 则停止迭代, 并显示结果。

2.2 同名特征建立策略

假设 p' 为待匹配表面上的任意点, 根据下列准则来确定其在基准表面上的对应点

$$p = \{p_i \mid x_{(SRp_i+T)} = x_p, y_{(SRp_i+T)} = y_p\} \quad (12)$$

式中, R 为旋转参数; T 为平移参数; (x, y) 为平面坐标; (p, p') 为同名特征点, 它们之间的 Z 坐标差 λ 即同名特征点的高差, 也是 LZD 匹配方法的观测量。

LZD 算法以上述方式建立的同名特征点可能存在“伪同名点”(由于错误的测量或遮挡等原因造成)。“伪同名点”的存在会严重影响匹配的质量, 需予以剔除。本文基于统计学原理, 在每

次求解过程中,对两表面对应点高差作统计,如图 3 所示。

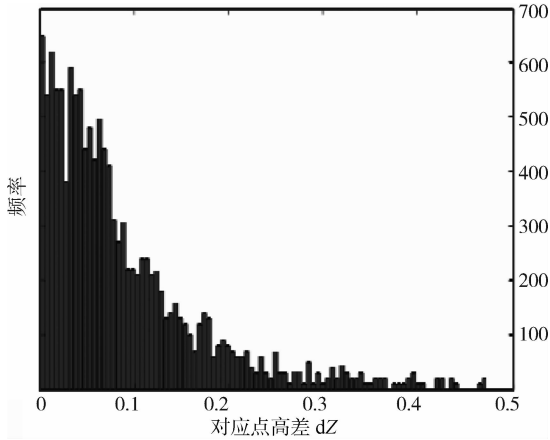


图 3 对应点高差分布图

Fig. 3 Typical distribution of matching elevation distances

由图 3 可看出高差有明显的峰值,则最高峰值出现的位置应该代表两个表面之间的真实高差。偏离真实高差越远则所含误差越大,超出一定的限度即认为是粗差点,选用以 3 倍中误差作为粗差判断的阈值: $\Delta = 3\sigma$, 其中 σ 为标准差的估计量。

2.3 权值的确定

从最小二乘估计的极值函数

$$V^T P V = \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 = \min \quad (13)$$

可看出,远离样本群体的观测值(通常是粗差或异常值)对残差平方和的影响大。要使残差平方和极小,就必然迁就那些异常值,从而导致最小二乘估计失去了对粗差的抵抗能力。由此可见,通过对观测值的权进行改化,即以等价权函数代替先验权阵,就可达到抑制异常值对参数估值影响的目的,从而获得具有抗差性的参数估值。本文采用 IGGI 等价权函数^[15]:

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i & |v_i/\hat{\sigma}| \leq k_0 \\ P_i \frac{k_0}{|v_i/\hat{\sigma}|} & k_0 < |v_i/\hat{\sigma}| \leq k_1 \\ 0 & |v_i/\hat{\sigma}| > k_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, k_0 和 k_1 分别为分位参数和淘汰点, k_0 可取 $[1.0, 1.5]$ 区间的常数; k_1 可取 $[2.5, 3.0]$ 区间的常数; σ 是剔除粗差后观测值的单位权中误差; v_i 为标准化残差。在算法中用等价权 $\bar{P} = \{w_i P_i\}$ 代替 P_i 即可。

2.4 迭代终止条件

迭代终止条件可以是:1) 单位权中误差满足

$\sigma_{0(i+1)} < \sigma_{0(i)}$ ($\hat{\sigma}_0^2 = (V^T P V + V_b^T P_b V_b)/r$, i 为迭代次数, $r = n - u$ 为多余观测, n 为观测方程个数, u 表示转换参数的个数,此处为 7, 否则停止迭代;2) 对应点高差 D 的均值 \bar{D} 满足 $\bar{D}_i < \bar{D}_{i-1}$, i 为迭代次数, 否则停止迭代。

3 实验

实验平台的配置如下:CPU 为 Intel Xeon E5420 2.50 GHz, 内存 3 GB, Windows XP 系统。

开发平台:Microsoft Visual Studio 2008 C++。

对算法相对高程精度的评价,采用“平均强度(average magnitude)”作为定量指标。其值利用 TerraMatch 软件的 Measure Match 工具测量得到,表示两匹配表面中对应点高差的平均值。如果重叠航带之间的高程系统误差已消除,则该值表示剩余随机误差)指标表征精度的高低。

3.1 实验数据

第 1 组数据裁剪自实测数据。数据由 ALS50-II 系统扫描获取,飞行高度 1350 m, 平均扫描点密度:2 点/m²。参考面数据约为 300 m × 300 m, 待匹配面由参考数据根据预设的转换参数进行旋转和平移得到,因而该组数据可认为是无随机误差和局部变形的“理想数据”。

第 2 组数据为 TerraSolid 软件示例数据(实测检校后数据),数据由 TopEye 系统扫描获取,4 条航带,飞行高度 100 m, 平均扫描点密度:4.5 点/m²。

3.2 实验

3.2.1 引入高斯-马尔柯夫模型实验

基于第 2 组数据考察引入高斯-马尔柯夫模型的必要性。

如表 1 所示, P_b 为七参数的先验权系数矩阵, P_b 的设置基于这种考虑:机载 LiDAR 数据旋转角不会太大,初始值全部赋予 0;旋转角对应权值总赋予 0,认为此参数可以任意变化。因此,只需考察其余四者权值的变化对匹配精度的影响,在此认为初始平移参数和比例因子等权,分别考虑 0、100、1 000、5 000、10 000 这 5 种情况。估算参数依次 $T_x, T_y, T_z, S, \varphi, \omega, \kappa$, 其值为相同实验条件下、在引入的高斯-马尔柯夫模型中对待求参数设置不同的权值时,求得的对应该转换参数。由表 1 可知:1) 对比估算参数变化情况可以看出权值的大小对匹配精度的影响:当权值设置为 0 时,对应

参数可以任意变化即变化幅度最大;随着权值的增大(0 到 10 000) 参数变化的幅度也越来越小,当权值为 10 000 时对应的参数基本不变可认为是常量,因而可以通过改变权值的大小达到对估算

参数控制的目的。2) 对比表中平均强度指标可知:只有设置合适的权值才能达到既对估算参数进行控制同时又提高匹配精度的目的,同时这也可证明引入高斯-马尔柯夫模型的必要性。

表 1 权值对参数的影响

Table 1 Weight impact on the parameters

P_b	估算参数	平均强度/m
0,0,0,0,0,0,0	1.346 61, -1.690 58, -0.783 05, 0.995 61, 0.010 56, -0.002 94, -0.002 18	0.043 8
10,10,10,10,0,0,0	1.267 92, -1.493 58, -0.748 88, 0.997 455, 0.010 545, -0.002 95, -0.002 58	0.037 4
100,100,100,100,0,0,0	1.091 90, -1.053 10, -0.676 00, 1.001 43, 0.010 54, -0.002 96, -0.001 97	0.021 2
1 000,1 000,1 000,1 000,0,0,0	0.993 66, -0.955 85, -0.590 30, 1.003 33, 0.010 02, -0.003 53, -0.001 33	0.028 3
10 000,10 000,10 000,10 000,0,0,0	1.001 3, -1.000 43, -0.329 698, 1.003 82, 0.006 88, -0.004 28, -0.000 37	0.088 8

注:实验中初始转换参数为(1, -1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)

3.2.2 基于理想数据的算法精度

实验基于第 1 组数据考察 LZD 算法的精度,考察方式是比较算法求得的转换参数和真实转换参数的差值,实验结果如表 2 所示。

待匹配数据是用参考数据按照如下 7 种方式得到:1) 沿 Z 方向平移 1m;2) 沿 Y 方向平移 2.3 m;3) 沿 X 方向平移 2.3 m;4) 沿 X 方向旋转 0.005 rad;5) 沿 Y 方向旋转 0.005 rad;6) 沿 Z 方向旋转 0.005 rad;7) 沿 X 方向平移 2.3 m、Y 方向平移 2.3 m、Z 方向平移 1 m、X 方向旋转

0.005 rad、Y 方向旋转 0.005 rad、Z 方向旋转 0.005 rad。则 7 种方式转换参数的真值分别为:(0, 0, -1, 1, 0, 0, 0);(0, -2.3, 0, 1, 0, 0, 0);(-2.3, 0, 0, 1, 0, 0, 0);(0, 0, 0, 1, -0.005, 0, 0);(0, 0, 0, 1, 0, -0.005, 0);(0, 0, 0, 1, 0, 0, -0.005);(-2.3, -2.3, -1, 1, -0.005, -0.005, -0.005)。表 2 分别与以上 7 种方式相对应,“实验值”为 LZD 算法求得的转换参数;“误差”为真值与实验值的差值。

由表 2 可知:

表 2 算法精度

Table 2 Algorithm accuracy

	Z+1 m		Y+2.3 m		X+2.3 m		$\omega+0.005$ rad	
	实验值	误差	实验值	误差	实验值	误差	实验值	误差
X	0.004 39	0.004 4	0.017 40	0.017 40	-2.290 97	-0.009 03	-0.001 38	-0.001 38
Y	-0.026 43	-0.026 4	-2.308 8	0.008 8	-0.000 61	-0.000 60	0.001 67	0.001 67
Z	-0.993 94	-0.006 1	-0.001 63	-0.001 63	-0.000 31	-0.000 31	-0.000 78	-0.000 78
S	1.000 2	0.000 2	0.999 86	-0.000 14	0.999 976	-2.4E-5	0.999 991	0.9E-5
W	-1.19E-6	-1.19E-6	-3.05E-6	-3.05E-6	-6.05E-7	-6.05E-7	-0.004 999 6	-0.4E-6
φ	3.16E-6	3.16E-6	-9.05E-5	-9.05E-5	-6.36E-7	-6.36E-7	-1.72E-7	-1.72E-7
κ	7.01E-5	7.01E-5	5.99E-5	5.99E-5	-5.11E-5	-5.11E-5	-5.69E-6	-5.69E-6
	$\varphi+0.005$ rad		$\kappa+0.005$ rad		综合			
	实验值	误差	实验值	误差	实验值	误差		
X	0.032 86	0.032 86	0.006 59	0.006 59	-2.341 29	0.041 29		
Y	-0.018 60	-0.018 60	0.009 96	0.009 96	-2.318 07	0.018 07		
Z	0.006 47	0.006 47	0.001 63	0.001 63	-0.997 28	-0.002 71		
S	1.000 14	0.000 14	1.000 11	0.000 11	1.000 27	-0.000 27		
s	-9.17E-8	-9.17E-8	-4.50E-7	-4.50E-7	-0.005 023	2.3E-5		
φ	-0.004 996	-0.4E-5	9.957E-7	9.957E-7	-0.004 97	-0.000 03		
κ	5.69E-5	5.69E-5	-0.004 82	-0.000 18	-0.004 34	-0.000 66		

1) 在不含有随机误差和局部变形情况下, 平移实验中算法求得参数误差最大为 0.009 m; 旋转实验中算法求得参数误差最大为 0.000 18 rad; 综合实验中平移误差最大值为 0.041 m, 旋转误差最大为 0.000 18 rad。图 4 给出了“综合”实验中平差前后的点云分布对比, 如图 4(a) 所示, 虽然高程的分布大致相同, 但显得杂乱无序, 同一地点有多个高程值对应; 图 4(b) 由于对 LiDAR 数据中每一个激光点数据的坐标值进行纠正, 同一地点对应的高程值基本吻合, 说明数据误差得到了较好的消除。

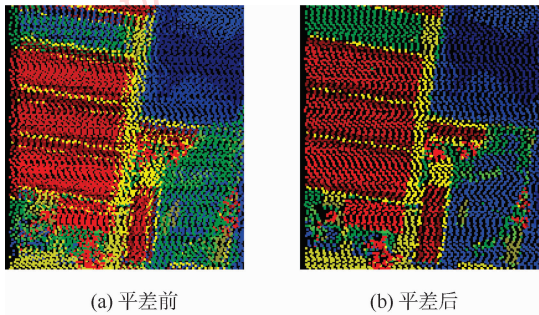


图 4 平差前后点云分布图
Fig. 4 Point cloud distribution

2) 可通过剖面图查看航带重叠区域同名特征间的吻合情况来定性的衡量平差前后相对精度。图 5(b) 平差后尖顶房屋剖面完全吻合。

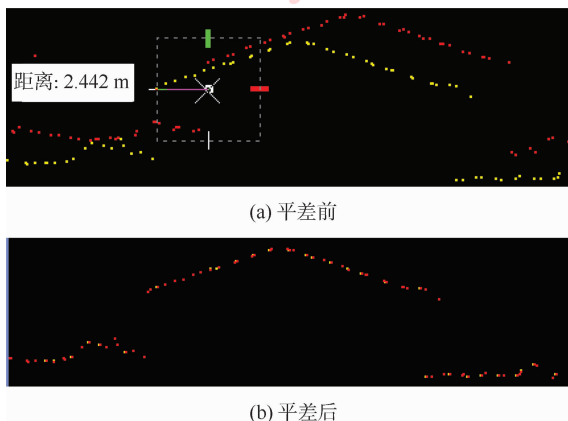


图 5 尖顶房屋剖面图
Fig. 5 Profile of the gable roof

3.2.3 算法精度实验

基于第 2 组实验数据考察 LZD 算法精度。如表 3 所示, 其中“*A* 和 *B*”表示航带 *A* 和 *B* 的平差实验, 其他类推。

实验结论: 1) 由原始数据的平均强度数据可知: 原始数据虽然已利用厂家提供的系统检校参数

进行了系统检校, 但是仍然有高程方向的系统误差。如表 3 中航带 *A* 和 *B* 基于“平均强度”指标定量考察其相对高程精度为 0.094 7 m, 这说明航带之间的高程还存在不小的偏移; 2) 利用 LZD 算法对相邻航带数据进行平差, 其相对高程精度较检校数据均有所提高。如表 3 中航带 *A* 和 *B* 平差后平均强度指标为 0.023 2。算法总体相对高程精度优于 0.05 m; 3) 对比 LZD 和 TerraMatch 平均强度指标可知: 仅从平均强度这一项指标来看, 引入高斯-马尔柯夫模型后的 LZD 算法和 TerraMatch 软件相比精度相当; 4) 可通过剖面图查看平差前、后数据吻合情况来检查数据的相对精度, 如图 6 为平差后精度最差的航带 *A* 和 *C* 斜坡剖面图, 基于 LZD 的机载 LiDAR 航带平差方法获取的结果可以满足工程生产的精度需求。

表 3 算法精度对比

Table 3 Accuracy comparison between LZD algorithm and TerraMatch

	/m					
	<i>A</i> 和 <i>B</i>	<i>D</i> 和 <i>C</i>	<i>D</i> 和 <i>A</i>	<i>B</i> 和 <i>C</i>	<i>A</i> 和 <i>C</i>	<i>B</i> 和 <i>D</i>
原始数据	0.094 7	0.097 8	0.098 3	0.093 8	0.113 0	0.099 5
LZD	0.023 2	0.021 2	0.024 8	0.023 2	0.029 7	0.028 3
TerraMatch	0.018 3	0.025 8	0.019 6	0.023 5	0.032 5	0.015 0

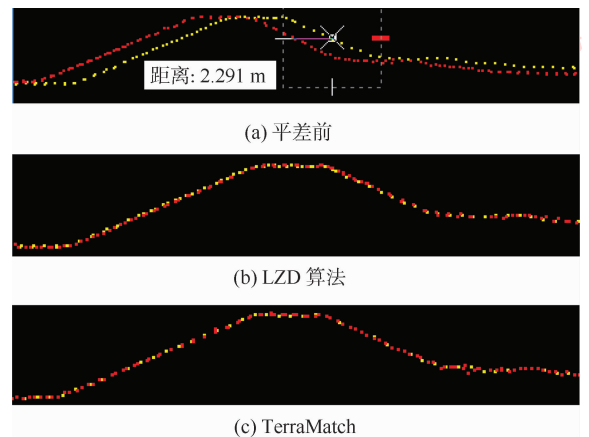


图 6 “航带 *A* 和 *C*”斜坡剖面
Fig. 6 Bank profile of the strip “*A* and *C*”

4 结 论

提出借助表面匹配技术完成机载 LiDAR 航带平差, 并使用 LZD 算法加以实现; 将高斯-马尔柯夫

模型引入基于 LZD 的机载 LiDAR 数据的航带平差,以提高平差精度。实验部分考察引入高斯-马尔柯夫模型的必要性及算法精度。实验表明:在对高斯-马尔柯夫模型进行合理的参数配置后,使用引入高斯-马尔柯夫模型的 LZD 航带平差方法可以显著的提高平差精度;使用 LZD 进行机载 LiDAR 航带平差获取的结果均可以满足工程生产的精度需求;与商业软件 TerraMatch 的结果相比, LZD 的精度和 TerraMatch 的精度相当。

LZD 算法只是通过最小化所有对应点间的高差的平方和来求解表面转换参数,其表面转换参数只有 7 个,对于 7 个参数不足以描述航带真实变形情况,航带平差的效果可能有限,此时平差模型需要更新,采用 9 参^[8]甚至 12 参^[16],本文未考虑,需完善;本文算法适用于系统检校后残余系统误差的消除,同样适用于原始未检校点云数据,因为算法基于“变换”来实现的,具有一定的普遍性;两条相邻航带的形变 7 参数放到其他航带上就不再适用,必须重新求解,这也是数据驱动模型本身存在的局限。

志谢 此次实验数据由中国测绘科学研究院航测所提供,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

[1] Schenk T. Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners [D]. Ohio, USA: The Ohio State University, 2001.

[2] Jiang Y S. A rigorous positioning equation and its error analysis and precision evaluation for integrated positioning system of airborne GPS, INS and laser scanning ranging [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5 (4): 241-247. [江月松. 机载 GPS、姿态和激光扫描测距集成定位系统的精确定位方程、误差分析与精度评估 [J]. 遥感学报, 2001, 5 (4): 241-247.]

[3] Habib A, Bang K, Kersting A P, et al. Error budget of LiDAR systems and quality control of the derived data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2009, 75 (9): 1093-1108.

[4] Triglav-Cekada M, Crosilla F, Kosmatin-Fras M. A simplified analytical model for a-priori Lidar point positioning error estimation and a review of Lidar error sources [J]. Photogramm. Eng. Remote Sensing, 2009, 75: 1425-1439.

[5] Shan J, Toth C K. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.

[6] Crombaghs M E, Min D, Bruegelmann R. On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33: 230-237.

[7] Kornus W, Ruiz A. Strip adjustment of LiDAR data [J]. Dresden: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 34 (3/W): 47-50.

[8] Vosselman G, Maas H G. Adjustment and filtering of raw laser altimetry data [C]. // Proceeding of OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Model. Stockholm: OEEPE Official Publication, 2001, 40: 62-72.

[9] Maas H G. Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laser scanner data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2002, 68 (9): 933-940.

[10] Zhang D Y, Wu W Q, Wu M P. Calibration technology of airborne lidar [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17 (11): 2806-2813. [章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (11): 2806-2813.]

[11] Bang K I. alternative methodologies for LiDAR system calibration [D]. Alberta: University of Calgary, 2010.

[12] Yuan F. Research on data processing and classification of land use of airborne LIDAR data [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2010. [袁枫. 机载 LIDAR 数据处理与土地利用分类研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2010.]

[13] Zhang T G, Cen M Y, Feng Y C. Comparison of LZD and ICP algorithms in DEM matching without control points [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11 (5): 714-719. [张同刚, 岑敏仪, 冯义从. 用于无控制 DEM 匹配 LZD 和 ICP 算法的比较 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11 (5): 714-719.]

[14] Devrim A. Least squares 3D surface matching [D]. Swiss: Karadeniz Technical University, 2007.

[15] Wang L P, Yu X X. Two equivalent weight Functions' anti-poor analysis [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1998, 6: 5-7. [王列平, 余学祥. 两种等价权函数的抗差效果分析 [J]. 测绘通报, 1998, 6: 5-7.]

[16] Kilian J, Haala N, English M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31: 383-388.