

车载激光测绘系统的标定

李磊*, 严洁, 阮友田

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要:介绍了车载激光测绘系统的组成和工作原理。对系统中的激光扫描仪增设了可见光源作为标校参考光,以便有效地确定激光测量中心和扫描方向,并直接测量部分标校参数。根据其特点,设计了基于可见参考光的标校方案。进行了静态标校试验和激光测绘系统动态精度测量试验,试验得到标定误差为0.028 1 m,系统平面定位误差为0.288 m。通过系统精度试验分析,进一步验证了标定方案的正确性和有效性。

关键词:激光测绘;车载系统;激光扫描仪;标定

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130603.0353

Calibration of vehicle-borne laser mapping system

LI Lei*, YAN Jie, RUAN You-tian

(27th Institute of Electronics, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

* Corresponding author, E-mail: lileicwg@sina.com

Abstract: The composition and principle of a vehicle-borne laser mapping system are described in this paper. A visible light source is designed for a laser scanner in the vehicle-borne laser mapping system, by which the laser measuring center and scanning direction can be determined effectively and a parts of calibration parameters are able to be measured directly. A calibration scheme based on the visible light source is designed, then static calibration experiment and dynamic measurement are performed. Obtained results show that the calibrating error is 0.028 1 m and plane positioning error is 0.288 m. The experiment results and analysis prove the correctness and validity of calibration project.

Key words: laser mapping system; vehicle-borne system; laser scanner; calibration

1 引言

随着数字城市的蓬勃发展,作为获取城市空间信息的最新手段—车载激光测绘系统由于具有低成本、高精度、高效快速测量的特点而得到了广泛的应用。车载激光测绘系统是多传感器协同工作的系统,在载车前行过程中,激光雷达(LIDAR)、全球定位系统(GPS)、惯性导航单元(IMU)、电荷耦合装置(CCD)等传感器分别进行目标距离、载车位置、载车姿态、目标属性信息的测量,最后通过事后的数据融合,将目标定位到大地坐标系下。

由于激光测绘的最终目的是将每个目标点统一到大地坐标系下,使每个目标点具有唯一的空间位置,因此,必须将GPS中心位置和IMU测量姿态传递给激光雷达,这个传递过程就是系统的标定过程,包括激光测量参考点与GPS相位中心的偏心标定和激光扫描坐标系与IMU坐标系的旋转角度标定^[1-2]。目前,国外成熟的车载激光测绘系统有Riegl的VMX450系统,Optech的LYNX系统和Topcon的IP-S2系统,它们均在测绘领域得到大量应用。但是,这些商业系统对系统标定没有成熟统一的方案,大多需要用户根据系统配置和测量方式自行设计。由于激光测绘系统多采用近红外光源,人眼不可见,用户在使用过程中通常采用标校场标定的方法,即车载测绘系统对标校场进行动态测量,利用标校场的已知控制点,通过反推的方法确定激光与测量坐标系的位置关系和旋转关系^[1,3-7]。

本文对测绘系统中的激光扫描仪增加了标校参考光,该光源与激光测量光源同轴设计,在系统标校时,通过该光源使激光扫描方向人眼可见,从而使激光测绘系统的标校简单易行。

2 车载激光测绘系统组成和工作原理

车载激光测绘系统由激光扫描仪、全球定位系统、惯性导航系统和CCD相机等传感器构成。本文涉及的激光扫描仪为自主研发,采用传统的

脉冲测距体制,包括激光发射单元、光学系统、光电接收处理单元、扫描单元、距离测量与时间同步单元、图像处理和显示单元、扫描定位单元和标校指示器。激光发射单元采用光纤激光器实现激光的高重频、窄脉冲发射;光学系统实现发射激光的整形和接收激光的回收和汇聚;光电接收处理单元实现光电转换和微弱信号的提取;扫描单元采用电机带动六面体转镜旋转实现激光的快速线性扫描;距离测量与时间同步单元实现目标距离测量和GPS的标准时间接收;图像处理和显示单元完成图像的时间空间的映射转换、滤波、显示和存储;扫描定位单元实现六面体各扫描面的有效起始位置确定。激光扫描仪专门设计的标校指示器,采用可见光作为光源供系统标校使用。激光扫描仪原理框图见图1。

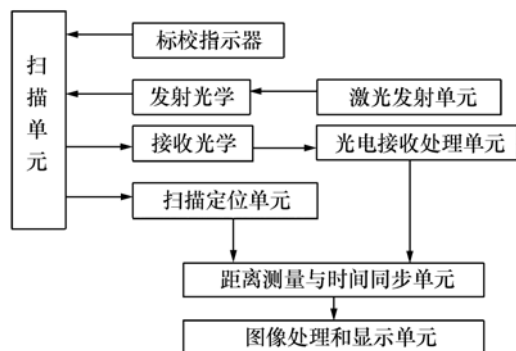


图1 激光扫描仪原理框图

Fig. 1 Block diagram of laser scanner

系统工作前,首先对激光扫描仪、全球定位系统、惯性导航系统和CCD相机等传感器的空间位置进行标定;系统工作时,各传感器均按各自的采样频率进行测量,但对采样时刻的标注均采用GPS标准时间;测量完成后,利用系统各传感器时间和空间的统一实现数据的融合和目标的测量。

2.1 系统坐标系定义

(1) 激光扫描仪坐标系

激光扫描仪坐标系以激光发射参考点为原点, x 轴指向车右侧, y 轴指向车前进方向, z 轴与 x,y 轴构成右手系。

(2) 激光扫描坐标系

激光扫描坐标系以激光发射参考点为原点, x

轴指向瞬时激光束方向, y 轴指向车前进方向, z 轴与 x, y 轴构成右手系。

(3) 车顶平台坐标系

车顶平台坐标系以 GPS 天线中心为原点, x 轴指向车右侧, y 轴指向车头前进方向, z 轴与 x, y 轴构成右手系。

(4) 大地坐标系

通常所说的高斯三度带坐标, x 轴向东, y 轴向北, z 轴为高程方向。

激光测绘系统坐标系见图 2, 其中 β 为激光扫描坐标系绕激光仪器坐标系 y 轴旋转的角度, 扫描线向上为正, 向下为负。 ρ 为激光扫描参考点到目标的距离。

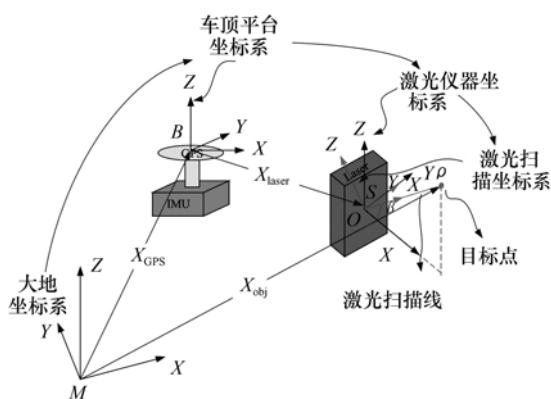


图 2 车载激光测绘系统坐标系

Fig. 2 Coordinate of mobile laser mapping system

2.2 激光测量几何模型

(1) 激光点坐标模型

激光测量点模型为:

$$\mathbf{r}_i^m = \mathbf{r}_{GPS}^m(t) + \mathbf{R}_b^m(t) [\mathbf{R}_s^b \mathbf{r}_s + \mathbf{r}_b], \quad (1)$$

其中: \mathbf{r}_i^m 为目标在大地坐标中的坐标; $\mathbf{r}_{GPS}^m(t)$ 为 GPS 天线在大地坐标系中的坐标, 通过 GPS 测量得到; $\mathbf{R}_b^m(t)$ 为车顶平台相对于大地坐标系的旋转矩阵, 通过 IMU 测量得到; \mathbf{R}_s^b 为激光扫描仪相对于车顶平台的旋转矩阵, 通过标定得到; \mathbf{r}_s 为目标相对激光扫描仪的坐标, 由激光扫描测量得到; \mathbf{r}_b 为激光扫描仪相对于 GPS 的位移, 通过标定得到。

(2) 激光扫描模型

激光扫描模型为:

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{R}_L^s(t) \mathbf{r}_L(t) = \begin{bmatrix} \cos\beta_t & 0 & -\sin\beta_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta_t & 0 & \cos\beta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_t - d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: \mathbf{r}_s 为目标相对于激光扫描仪坐标; β_t 为扫描角度; S_t 为扫描距离; d 为距离改正值。

2.3 激光标定模型

当激光扫描到的平面上存在 3 个已知坐标的点时, 可确定平面的表达式:

$$\mathbf{V} = \begin{vmatrix} X & Y & Z & 1 \\ X_A & Y_A & Z_A & 1 \\ X_B & Y_B & Z_B & 1 \\ X_C & Y_C & Z_C & 1 \end{vmatrix} \times \frac{1}{6} = 0, \quad (3)$$

式中: X, Y, Z 是激光点的坐标; $(X_A, Y_A, Z_A), (X_B, Y_B, Z_B), (X_C, Y_C, Z_C)$ 是平面上 3 个已知点的坐标。

假设一个平面上有 N 个激光点, 则可利用上式列出 N 个方程, 未知数为激光扫描仪相对于 GPS 天线中心的位置 (x, y, z) 和激光扫描中心相对于 IMU 的姿态 $(\varphi, \omega, \kappa)$, 一共有 6 个。当 $N \geq 6$ 时, 可完成激光标定参数的求解。

3 激光标定方案

采用激光标定模型进行系统标定时, 物方坐标系与像方坐标系下的同名控制点的查找是标定的关键, 但由于激光成像的特殊性, 用激光脚点数据与地物特征点匹配存在较大误差。利用本系统设计的与激光同轴安置的标校参考光, 可以清楚地确定激光的出光点和扫描线的扫描方向。激光出光位置确定后, 由于 GPS 测量中心是确定的, 可直接测量激光测量中心相对 GPS 天线中心的偏移量, 即实现标定模型中 x, y, z 的参数标定; 由于标校光在平面上形成的扫描线是可见的, 利用出射点和扫描线, 可获得激光出射方向, 与 IMU 航向角比对后得到激光扫描线与车头行进方向的夹角, 即标定模型中 φ 的参数; 激光启动扫描后, 激光扫描线在两个标校平面留下扫描轨迹, 测量轨迹上的点作为控制点, 利用标定模型求取剩余的标校参数。构建的标定场见图 3, 左下部倾斜

平面为自制的标校板,尺寸为 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$,对应激光扫描仪的近距离和俯仰负角度,图中垂直平面利用建筑物墙体,高度约为 30 m ,对应激光扫描仪的远距离和俯仰正角度,标校板与墙面间隔距离约为 10 m 。激光扫描线同时扫过两个标校平面,两个标校平面覆盖了不同的距离和扫描角度,可以更加准确地实现系统标校。由于标校平面的分层放置,利用距离突变点可以在激光云图中清楚地分离不同的标校平面对应的数据。

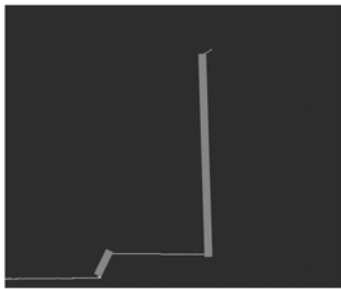


图3 激光标定场

Fig.3 Calibration field of laser mapping

4 激光标定试验

激光标定试验分3个阶段进行:

(1)利用可见标校参考光与全站仪量取激光扫描仪参数的初值,包括激光扫描仪相对于GPS天线中心的偏心标定和激光扫描线与车头行进方向夹角的标定。

(2)在控制场上的两个GPS控制点上放置两台经纬仪,利用前方交会原理分别测量两个标定面上的点,每个平面至少3个点。

(3)利用距离突变点在激光扫描数据中分离出每个平面对应的距离和角度信息,利用激光标定模型和第一阶段得到的参数初值进行参数计算。

激光标定结果见表1,其中 X 、 Y 、 Z 为激光测量中心相对GPS测量中心的偏移量, F_i 、 W_o 、 K_a 为激光扫描线相对IMU姿态(偏航、俯仰、横滚)的偏差。

表1 激光扫描仪标定参数结果

Tab.1 Calibration results of laser scanner

参数项	X/m	Y/m	Z/m	中误差/m
参数值	5	0.433	0.084	
参数项	$F_i/(\text{°})$	$W_o/(\text{°})$	$K_a/(\text{°})$	0.028 1
参数值	59.344 127 4	0.563 576 8	-4.193 334 1	

5 激光精度试验与分析

车载激光系统构建了一个精度试验场,选择一栋规则形状的独立建筑物,周围无树木等地物遮挡,布设了两个GPS控制点和数十余个图根控制点,2个GPS控制点坐标分量误差在 2 cm 以内,图根控制点坐标分量误差在 5 cm 以内。

车载激光测绘系统在试验场对标定过的建筑物进行了动态扫描试验,试验结果见表2。

车载激光测绘系统的误差源包括:

(1)激光测距误差,取决于设备本身、目标反射率、目标形状等^[8],本次试验测距误差为 0.05 m 。

(2)激光扫描角度误差,受扫描稳定度、扫描角度的影响,本次试验误差最大为 0.05° 。

(3)GPS动态定位误差,受对流层延迟误差、电离层延迟误差、多路径误差等误差影响,本次采用动态载波相位差分法进行标定,定位误差为 0.05 m 。

(4)IMU姿态误差,此次车载激光扫描系统所采用集成平台的航向精度为 0.1° ,俯仰角和翻滚角的精度为 0.1° 。

(5)人为选点误差,受激光测量点密度影响,与车速、激光扫描速率和目标距离有关,本次试验人为选点误差为 0.05 m 。

(6)激光标定误差,取决于系统标校仪器、标校场测量精度等,本次激光标定误差为 0.03 m 。

表2 车载激光精度检验结果

Tab.2 Precision examination results of laser mapping system

序号	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta h/m$	平面定位精度/m
1	0.145	-0.059	0.676	0.156
2	-0.025	0.155	0.760	0.157
3	0.198	0.187	0.847	0.272
4	0.239	0.218	0.896	0.323
5	-0.062	0.131	0.791	0.145
6	-0.099	0.175	0.755	0.201
7	-0.036	0.132	0.893	0.137
8	0.093	0.199	0.849	0.220
9	-0.014	0.080	0.823	0.081
10	0.197	0.386	0.853	0.434
11	0.107	0.320	0.859	0.338
12	0.222	0.311	0.870	0.382
13	0.145	0.305	0.910	0.338
14	0.119	0.301	0.894	0.324
15	0.095	0.207	0.861	0.228
16	0.211	0.197	0.970	0.289
17	0.251	0.295	0.888	0.387
18	0.102	0.406	0.951	0.418
中误差	± 0.150	± 0.246	± 0.855	0.288

(7)时间误差,由于车载系统平台运动速度较低,且使用的石英钟频率稳定度达到 10^{-6} ,由此产生的位置误差可以忽略不计。

6 结 论

本文设计的激光测绘系统标校方案利用了激光扫描仪的可见标校参考光,有效地确定了激光测量中心和扫描方向,直接测量了大部分标校参

数(x, y, z, φ)。利用距离突变点在激光云图上易于识别的特点,通过设计的简易标校场解决了物方同名点与像方同名点不易确定的问题,使激光测绘系统的标定在载车静态下即可完成,避免了动态下GPS/IMU组合的不确定因素对标校的影响。车载动态精度试验验证了标定方案的有效性。通过精度分析可知,提高激光扫描仪的测距和测角精度并采用高精度的GPS/IMU组合系统将会进一步提高系统的测量精度。

参考文献:

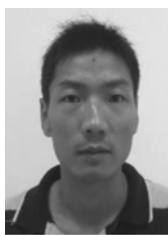
- [1] 王飞,段建民,高德芝,等.一种雷达和摄像机的空间标定方法[J].计算机测量与控制,2012,20(2):454-456. WANG F, DUAN J M, GAO D ZH, *et al.*. A method of spatial calibration for camera and lidar[J]. *Computer Measurement Control*, 2012, 20(2):454-456. (in Chinese)
- [2] 康永伟,钟若飞,吴保.车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J].红外与激光工程,2008,37(增):249-253. KANG Y W, ZHONG R F, WU Y. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2008, 37(Supp):249-253. (in Chinese)
- [3] FILIN S, CSATHÓ B, SCHENK T. An analytical model for in-flight calibration of laser sltimeter systems using natural surfaces[C]//The Annual Conference of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing(ASPRS)2001, April 24-27, 2001, St. Louis MS, 2001.
- [4] GLENNIE C, LICHTI D D. Static calibration and analysis of the velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning [J]. *Remote Sens.*, 2010, 2(6):1610-1624.

- [5] RIEGER P, STUDNICKA N, PFENNIGBAUER M. Bore-sight alignment method for mobile laser scanning systems[J]. *J. Appl. Geodesy*, 2010, 4(1):13-21.
- [6] LICHTI D D. Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system[J]. *ISPRS J. Photogram. Remote Sensing*, 2007, 61(5):307-324.
- [7] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论和方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
ZHANG X H. *Air-borne Laser Measure Technology Theory and Method*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
DAI Y J. *Laser Technology*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



李磊(1973—),女,河南新乡人,硕士研究生,高级工程师,1996年于南京理工大学获得学士学位,主要从事激光雷达、光通讯等方面的研究。E-mail: lileicwg@sina.com



阮友田(1979—),男,湖北孝感人,学士,工程师,2002年于长春理工大学获得学士学位,主要从事激光测量、图像处理等方面的研究。E-mail: nbaibai@sohu.com



严洁(1973—),女,河南信阳人,硕士生,高级工程师,1997年于杭州电子科技大学获得学士学位,2006年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事激光测量等方面的研究。E-mail: 1916757427@qq.com