

## 车载三维激光扫描系统安置参数一站式标定

王 力<sup>1,2</sup>, 李广云<sup>2</sup>, 杨新永<sup>3</sup>, 王永乐<sup>3</sup>, 周阳林<sup>1,2</sup>, 崔 谦<sup>4</sup>

- (1. 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 100044;
2. 信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450052;
3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308; 4. 胜利石油工程公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257000)

**摘 要:** 移动测量技术提供了一种高效的数据获取手段, 可用于智慧城市建设等诸多领域。三维激光扫描仪具有测量速度快, 精度高等优点, 将其作为车载系统中的主要测量传感器具有较大的优势。以车载系统集成中三维激光扫描仪安置参数的标定为研究对象, 从简化数学模型以降低计算复杂度和削弱舍入误差、采用回光反射材料制作的人工标志作为标定媒介提高标定精度、一站式提高标定效率三个方面对现有标定方法进行改进。通过实测数据计算, 该方法得到的参数标定精度为 6 mm 级, 系统的整体设计精度为 5 cm 级, 因此该方案能够满足多种测量任务系对车载统精度的需求。

**关键词:** 一站式标定; 安置参数; 偏心矢量; 偏心角度; 标志识别与定位

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1106005

## One-site calibration of mounted parameter method for 3D mobile laser scanning

Wang Li<sup>1,2</sup>, Li Guangyun<sup>2</sup>, Yang Xinyong<sup>3</sup>, Wang Yongle<sup>3</sup>, Zhou Yanglin<sup>1,2</sup>, Cui Qian<sup>4</sup>

- (1. Key Laboratory for Urban Geomatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100044, China;
2. Institute of Navigation and Aerospace Targets Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
4. Research Institute of Drilling Technology, Shengli Petroleum Engineering Company, Dongying 257000, China)

**Abstract:** Mobile mapping technology provides an efficient means of data acquisition, which can be used in many areas such as smart city construction. It is an advantage to integrate 3D laser scanner into MMS for the feature of quick speed and high accuracy. The mounted parameter calibration of 3D laser scanner had been studied and three improvements were made on the existing calibration method. Firstly a simpler mathematical model was put forward to reduce the calculation complexity. Secondly, man-made targets of retro-reflective material were used to improve calibration accuracy. Lastly one-station calibration scheme was adopted to improve the efficiency. According to the measured data, the calibration accuracy of the method was 6 mm, and the overall design accuracy of the system is 5 cm, so the scheme can meet the requirements of the accuracy of the vehicle system.

**Key words:** one-station calibration; mounted parameter; lever arms; boresight angles; targets recognition and location

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41501491, 41274014); 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(20131204WY)

作者简介: 王力(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光扫描系统集成及数据处理与应用开发方面的研究。Email: wangli\_chxy@163.com

## 0 引言

激光扫描技术是激光技术发展中的一项新的成果,能够高速度、高精度、高分辨率的获取目标的 3 维信息,实现“复制”测量,被认为是测绘领域继全球定位系统(Global Position System, GPS)后的又一次技术革新。随着激光扫描速度、精度以及海量数据处理能力的不断提高,激光扫描仪逐步成为车载移动测量系统的主要传感器,相应的设备称为车载激光扫描系统(Mobile Laser Scanning, MLS)<sup>[1]</sup>。日本东京大学尝试将激光扫描仪用于移动测量,在 2000 年研制出 VLMS 移动激光扫描系统。由于当时采用的激光扫描仪频率较低,限制其测量速度只能达到 10~20 km/h,且测量精度较低。随着越来越多的研究者投入到系统的研制与技术革新中,国内外出现了一系列车载激光扫描系统<sup>[2-7]</sup>,国外系统有 Laser scanner MMS<sup>[8]</sup>, Street Mapper<sup>[9]</sup>, ROAMER system, Lynx system, Ip-S2, MX8 及 VMX-450 等;国内系统有 LD2011, V-Surs I, SSW 及 iScan 等<sup>[10]</sup>。车载移动测量系统中采用的激光扫描仪多为 2 维激光扫描仪,如 Reigl 公司的 VMX-450 搭载两台 2 维激光扫描仪 VQ450,拓普康公司的 Ip-S2 采用了 SCIK 扫描仪<sup>[11]</sup>。一方面,2 维扫描仪难以单独使用,闲置时造成资源浪费;另一方面,许多单位配备了地面 3 维激光扫描仪,但仅能用来做静态的设站测量,而且须要进行多站拼接,效率低下。因此,研究移动的地面 3 维激光扫描系统具有多个优点:测量系统既能以 2 维的帧扫描模式进行移动测量;也可以采用走停模式对重点区域进行精细的 3 维全景扫描;平时也可将地面 3 维激光扫描仪单独取下进行静态测量使用。

激光扫描仪相对于载体安置参数的标定影响最终具有绝对坐标点云的精度,因此安置参数的标定成为系统集成中的一个关键环节。已有的参数标定方法多为针对 2 维激光扫描仪<sup>[2-7]</sup>。Rieger 对 3 维激光扫描仪的安置参数标定进行了研究,提出利用建筑物的立面,以激光扫描仪从不同角度扫描得到的点云来计算得出安置参数<sup>[8]</sup>。该方法设置 6 个水平角,需要 6 次移动扫描,增加了标定的工作量;检定场需有多个平面度较高且分布均匀的立面,降低了方法的适应性;另外,采用现实中已经存在的立面,

虽然降低成本,但平面度对标定精度造成影响。文中根据 3 维激光扫描仪的特点,采用人工标志辅助,提出一种一站式安置参数的标定方法。

## 1 技术路线

车载激光扫描系统通过搭载在载车上的定姿定位系统和激光扫描仪(或搭载相机作为辅助)动态、实时获取航迹周围一定范围内目标的地理信息数据的系统,其构成部分如图 1 所示。其中,定姿定位系统一般由全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)及车轮编码器(Distance Measuring Indicator, DMI)等设备组成,能够提供载体在工作任意时刻的位置和姿态信息。由于激光扫描仪得到的原始点云定义在仪器坐标系下,而 MLS 工作时系统处于运动状态,不难得出,原始的每个点都在不同的坐标系下,要得到测量对象正确的绝对坐标,这就需要通过实现空间上的统一:首先需要知道激光扫描仪与定位定姿系统坐标系间的转换关系(由安置参数确定)将原始点云转换到平台坐标系下,再通过定位定姿结果将点云转换到大地坐标系下或者选定的测图坐标系下,从而完成直接地理参考(Direct Geo-referencing, DG)。文中从 3 个方面对现有的参数标定方法进行改进。

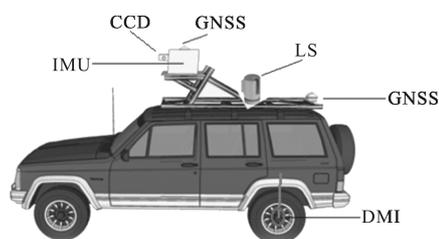


图 1 MLS 组成部分

Fig.1 Component of MLS

### 1.1 数学模型

激光扫描仪相对定姿定位系统的安置参数为 3 个平移参数和 3 个旋转参数,又分别被称为偏心矢量(Lever arms)和偏心角(Mounted angles,或Boresight misaligned angles)。DG 中涉及 4 个最基本的坐标系(一些学者还定义了过渡坐标系),要求解安置参数,目前算法都首先建立起整体的坐标转换模型,至少包含 3 次坐标转换,然后根据公共点的绝对坐标和

瞬时点云坐标,通过最小二乘法估计参数。由于涉及多次转换,整个模型较为复杂;两套坐标尺度差距较大,直接计算容易产生舍入误差。因此,文中提出首先将公共点的绝对坐标通过定姿定位结果转换到载体坐标系,从而将复杂的参数估计数学模型简化成单次坐标转换的参数解算模型。

### 1.2 标定精度

目前的标定方法多采用场景中固有的特征,如交点(窗框交点等)、建筑物立面、灯柱和线杆等。由于加工制造的精度等级不高造成这些特征本身的缺陷,使得参数解算的精度不高。文中采用回光反射材料制作的圆形平面人工标志为目标,精确获取人工标志在大地坐标系下和在点云中的两套坐标来进行参数解算,从而大幅提高参数标定的精度。

### 1.3 标定效率

Rieger 采用 3 维激光扫描仪,以 2 维采集方式设置 6 个不同的水平扫描角,通过 6 次扫描的结果进行参数解算,过程较为复杂。考虑到 3 维激光扫描仪能得到目标 3 维点坐标的特性,文中在定姿定位系统(Position and Orientation, POS)正常工作后,使车载激光扫描系统在检定场短暂停止,并控制激光扫描仪以 3 维方式进行数据采集,迅速获取含有标志的检定场点云数据。需要指出的是,此时的 POS 是正常工作的,且其各项指标满足测量的要求。

综上所述,文中采用人工标志,由静态 3 维测量方式经简化的数学模型求解安置参数,主要步骤为人工标志坐标获取、模型建立与参数求解两个部分。

## 2 人工标志坐标获取

### 2.1 人工标志绝对坐标的获取

在移动测量中,目前绝对坐标系一般采用 WGS84 地心坐标系。要获得人工标志的高精度绝对坐标一般分为控制测量和碎步测量两个步骤。

#### (1)控制测量

高精度的控制测量是决定系统参数标定精度的一个很重要的因素,这样因为车载激光扫描得到的结果定义在绝对坐标系下。选定检定区域后,在区域内均匀布设必要的控制点,通过 GNSS 控制测量或者其它控制测量手段,与已知高等级控制点联测,解算得到控制点的绝对坐标。

#### (2)碎步测量

碎部测量是指基于控制下直接进行的散点测量。人工标志为圆形平面,粘贴在墙面上,要获得其绝对坐标,可通过全站仪等设备在测得的控制点上设站将仪器坐标系与绝对坐标系发生关联。各控制点提供的是 WGS-84 坐标系下的大地坐标和空间直角坐标,而全站仪测量需要平面坐标。通常的方法是首先将大地坐标投影到平面上,然后全站仪设站并测得标志的平面坐标,最后再经过投影反算得到各点的大地坐标。由于投影算法比较复杂,且正反算会导致一定的误差,文中采用一种简化的方法:采用站心坐标系,测得各特征点的站心坐标,然后经过坐标转换,得到各点大地坐标。

图 2(a)所示为站心坐标系与地心坐标系之间的

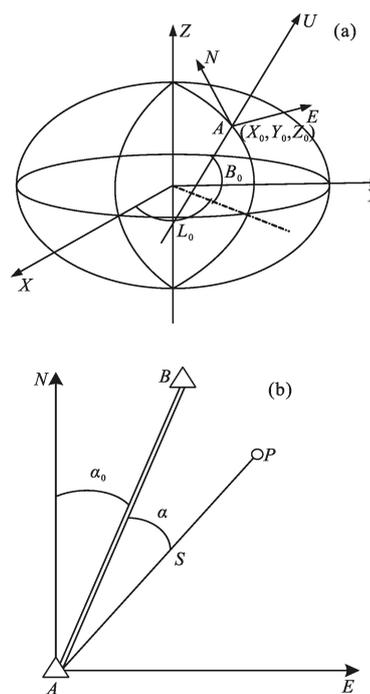


图 2 坐标系

Fig.2 Coordinate system

关系,站心坐标系原点 A 的大地坐标设为  $(B_0, L_0, H_0)$ ,相应的空间直角坐标形式为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,则任意一点的地心坐标  $(X, Y, Z)$  与站心坐标  $(N, E, U)$  之间的转换关系可用公式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于测区较小,垂线偏差和地球弯曲影响可忽略不计,以设站点为原点,建立站心坐标系,如图2(b)所示,A为设站控制点,B为定向控制点,P为待测碎部特征点。 $\alpha_0$ 为AB的已知方位, $\alpha$ 为水平角观测量, $s$ 为距离观测量。设 $h_A$ 为仪器高, $\beta$ 为垂直角观测量,则P点的站心坐标为:

$$\begin{aligned} N &= s \cdot \cos(\alpha_0 + \alpha) \\ E &= s \cdot \sin(\alpha_0 + \alpha) \\ U &= h_A + s \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

进而利用公式(1)的逆变换,可得到碎步特征点的地心坐标。

### 2.2 点云中人工标志的识别与定位

激光扫描除了能记录距离和角度信息,还能得到回光的强度信息,回光强度和材料相关,可用于人工标志数据的识别,即通过设置阈值一次性提取人工标志的点云;通过聚类方法,可将单个标志的点云聚在一起,从而将不同标志区分开;根据标志的形状特征剔除非人工标志;最后根据标志点云的特点,采用最基于回光强度加权的中心定位算法求取标志的中心坐标。

为了验证标志的提取精度,设置了以下实验,在一面墙上均匀布设9个平面人工标志。首先用经纬仪交会测量系统(10 m内坐标测量值由于0.1 mm)测量得到标志中心坐标作为基准值,部分标识的中心坐标见表1。然后将Riegl公司的3维激光扫描仪LMS-VZ400设置为快速扫描模式、分辨率设为 $0.03^\circ$ 进行全景扫描。将得到的点云数据导出,并采用文中算法进行标识识别与提取,见表2。采用四元数法进行公共点坐标转换<sup>[2]</sup>,并利用坐标差计算转换精度,得到该方法的标识提取精度为1.4 mm。

表 1 坐标基准(单位:m)

Tab.1 Coordinates benchmark(Unit: m)

Point No.	X	Y	Z
1	1.301 6	-1.571 5	0.768 7
2	1.475 7	2.518 9	0.991 9
3	2.218 9	1.824 4	1.004 0
4	1.808 3	-3.391 2	1.373 0
5	2.935 0	-1.938 7	1.253 9

表 2 点云中提取的标志坐标(单位:m)

Tab.2 Coordinates from pointcloud(Unit: m)

Point No.	X	Y	Z
1	3.267 5	0.241 3	0.733 9
2	1.495 6	3.932 7	0.966 2
3	2.478 3	3.669 5	0.975 2
4	4.569 8	-1.126 3	1.334 3
5	4.881 2	0.685 8	1.220 3

### 3 模型建立与参数标志

车载激光扫描系统涉及的最基本的4个坐标系为:地心坐标系WGS-84,当地水平坐标系LH,惯性平台坐标系I,激光扫描坐标系L。通常的参数解算模型为建立从L系转换到WGS-84的整体模型,优点是适合同时解算各次转换中涉及的参数。由于文中的研究对象为激光扫描仪的安置参数,因此采用更简化的模型,且能避免复杂模型中不同量级坐标造成的误差,算法的流程如图3所示。

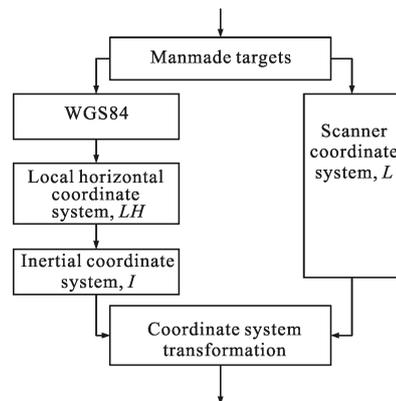


图 3 安置参数解算模型

Fig.3 Model of mounted parameters

安置参数解算模型涉及的坐标转换为:

#### (1)WGS84到LH

车载激光扫描系统中主GNSS接收机相位中心坐标为 $(B, L, H)$ ,直角坐标形式为 $(x_{B4}^G, y_{B4}^G, z_{B4}^G)^T$ ,设人工标志坐标为 $(x_{B4}^G, y_{B4}^G, z_{B4}^G)^T$ 。将WGS84坐标系绕Z轴逆时针旋转L,再绕Y轴顺时针旋转 $90^\circ + B$ ,得到旋转矩阵 $R_w$ ,可完成旋转变换。综合得到WGS84到LH变换模型为:

$$\begin{bmatrix} x_{LH} \\ y_{LH} \\ z_{LH} \end{bmatrix} = R_w \begin{bmatrix} x_{B4} - x_{B4}^G \\ y_{B4} - y_{B4}^G \\ z_{B4} - z_{B4}^G \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) LH 到 I

定姿定位系统得到 3 个瞬时姿态角：航向角 (Heading,  $H$ )、侧滚角 (Roll,  $R$ )、仰俯角 (Pitch,  $P$ )。姿态角可以确定由当地水平坐标系到惯性平台坐标系的 3 个旋转欧拉角,从而确定旋转矩阵为  $R_N$ 。惯导元件在进行导航时,加入了重力异常的补偿,使得 3 个欧拉角是以当地水平参考系(以参考椭球的法线作为  $z$  轴)为参考坐标系,即已经对垂线偏差做了改正。若将  $I$  的坐标原点定位天线相位中心,则标志绝对坐标在当平台坐标系的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \end{bmatrix} = R_N \begin{bmatrix} x_{LH} \\ y_{LH} \\ z_{LH} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 安置参数解算

激光扫描参考坐标系和载体参考坐标系都为 3 维右手直角坐标系,且二者间为刚性变换,因此可通过 3 个平移参数  $[\Delta x_i^t, \Delta y_i^t, \Delta z_i^t]T$  和 3 个旋转参数实现转换,旋转参数可从旋转矩阵  $R_M$  计算得出。坐标转换模型为:

$$\begin{bmatrix} x_V \\ y_V \\ z_V \end{bmatrix} = R_M \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_i^t \\ \Delta y_i^t \\ \Delta z_i^t \end{bmatrix} \quad (5)$$

得到旋转和平移矩阵,进一步可得到 6 个安置参数。

4 实验与分析

实验中使用的定姿定位系统为 Trimble Applanix 的 POS LV 220, 3 维激光扫描仪为奥地利 Riegl 公司的 LMS VZ-400。首先在检定区域布设靶标用徕卡全站仪 TS30 设站后测量得到标志的地心地固坐标,见表 3。然后将 POS 系统和激光扫描仪安置在载车上,并把 POS 中的 GNSS 同步信号输入激光扫描仪,进而实现系统的时间同步,如图 4 所示。为提高精度,标定场选在开阔的区域,道路两旁仅有低矮的建筑物及围墙,不会遮挡信号,容易消除多路径的影响,另外还方便粘贴分布合理的人工标志。当系统的 POS 精度满足采集需求时,在标定区域停止采集标志数据。最后根据文中的标定方案对数据进行处理,最终得到标志坐标见表 4。进一

步可得到 6 个安置参数。点云中标志的提取精度为 1.4 mm 级,同时全站仪获测量标志的精度也可达到 1 mm,甚至更优。经坐标转换残差得到安置参数(见表 5)的标定的精度为 6 mm,而系统的设计精度为 5 cm,因此标定得到的参数精度能够满足系统较高测量精度的需求。最终通过 DG 得到点云如图 5 所示。

表 3 全站仪测得的标志坐标(单位:m)

Tab.3 Coordinates from total station(Unit: m)

Point No.	X	Y	Z
1	-2 095 721.067	4 804 797.299	3 621 499.383
2	-2 095 721.067	4 804 797.299	3 621 499.383
3	-2 095 721.067	4 804 797.299	3 621 499.383
4	-2 095 721.067	4 804 797.299	3 621 499.383
5	-2 095 721.067	4 804 797.299	3 621 499.383

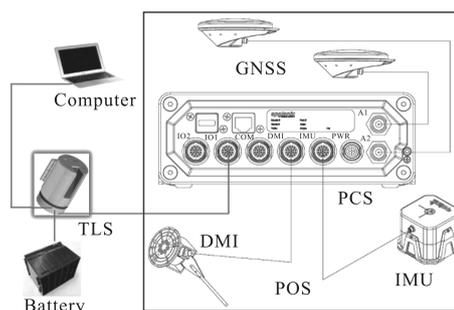


图 4 硬件连接

Fig.4 Hardware connection

表 4 点云中提取的标志坐标(单位:m)

Tab.4 Coordinates from point cloud(Unit: m)

Point No.	X	Y	Z
1	-7.730	-2.838	-0.106
2	-7.746	-2.863	-1.375
3	-12.261	-6.665	-0.414
4	10.944	15.273	0.200
5	7.053	1.623	-0.481

表 5 安置参数

Tab.5 Mounted parameter

$x_i^t/m$	$y_i^t/m$	$z_i^t/m$	$\omega_x/(\circ)$	$\omega_y/(\circ)$	$\omega_z/(\circ)$
-1.3787	0.323 8	0.374 5	178.942 9	-0.096 0	-60.154 4

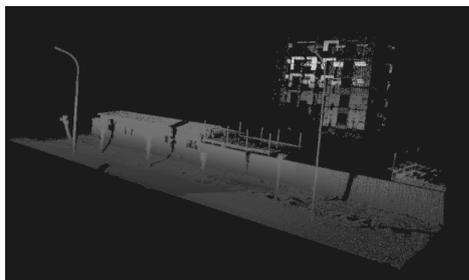


图 5 点云

Fig.5 Point clouds

## 5 结 论

提出一站式标定方法,从模型、精度、效率 3 个方面对已有方法进行了改进。为验证该标定方法的有效性,采用 3 维激光扫描仪 VZ-400 以及 POS LV220 进行系统集成,然后采用提出的一站式标定方法进行标定。测试结果中,标定精度为 6 mm,远远小于系统设计精度。因此,该方法能够很好的解决车载激光扫描系统中 3 维激光扫描仪的安置参数的高精度、高效率标定问题。此方案放弃已有方法中采用环境中现有交点、平面等特征的做法,而采用高精度的人工标志,提高了参数标定的规范性和可操作性。

## 参 考 文 献:

- [1] Shen Yan, Li Lei, Ruan Youtian. Mobile mapping technology by vehicle-borne LIDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 432-437. (in Chinese)
- [2] Tian Xiangrui, Xu Lijun, Xu Teng, et al. Calibration of installation angles for mobile LiDAR scanner system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3292-3295. (in Chinese)
- [3] Kang Yongwei, Zhong Ruofei, Wu Yu. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 249-253. (in Chinese)
- [4] Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan. Target plate calibration for vision-based airborne equipment mounted attitude boresight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2312-2320. (in Chinese)
- [5] Zhang Dayong, Wu Wendi, Wu Jiangping. calibration technology of airborne LIDAR [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2806-2813. (in Chinese)
- [6] Li Lei, Yan Jie, Ruan Youtian. Calibration of vehicle-borne laser mapping system[J]. *Chinese Optics*, 2013, 3(6): 353-358. (in Chinese)
- [7] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging LIDAR systems [J]. *Chinese Optics*, 2011, 3(4): 213-232. (in Chinese)
- [8] Rieger P, Studnicka N, Pfennigbauer M. Boresight alignment method for mobile laser scanning systems[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2010, 4(1): 13-21.
- [9] Hunter G, Cox C, Kremer J. Development of a Commercial laser scanning mobile mapping system-StreetMapper [C]//In Proceedings of Second International Workshop on the Future of Remote Sensing, 2006(10): 325-328.
- [10] Li Deren. Mobile mapping technology and its applications[J]. *Geospatial Information*, 2006, 4(4): 1-5.
- [11] Hock C W, Caspary H, Heister J, et al. Architecture and design of the kinematic survey system KiSS[C]//3rd Int Workshop on High Precision Navigation, 1995 (8): 569-576.