

360°连续扫描的便携式三维激光雷达设计与开发

胡少兴¹ 张爱武² 刘海云¹ 杨帆²

(¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100087
²首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037)

摘要 针对三维激光雷达在国内有巨大的应用市场,而国外商业三维激光雷达十分昂贵的现状,开发了一种 360°连续扫描的便携式三维激光雷达系统。采用一个二维激光扫描仪与高精度转台连接,通过步进电机控制形成三维激光扫描。在分析系统误差来源的基础上,提出了系统误差校正方法,给出了三维坐标精确计算公式。实验结果表明,系统测量精度高,数据质量好。系统作用距离 80 m,测距精度可达 6 mm,测量速度每秒 7256 点,可满足室内室外大规模场景三维数据快速获取的需求,而成本仅是国外同类商业三维激光雷达价格的四分之一左右,且重量轻体积小,携带方便。

关键词 应用激光; 三维激光雷达; 同步控制; 误差校正

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0168

Designing and Developing a 360° Continuous Scanning Portable 3D LIDAR System

Hu Shaoxing¹ Zhang Aiwu² Liu Haiyun¹ Yang Fan²

(¹School of Mechanical Engineering & Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China
²Key Laboratory on 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract 3D LIDAR in China has a huge market, but foreign commercial 3D LIDAR is very expensive. So a 360° continuous scanning, portable 3D LIDAR system is developed. A 2D laser scanner (SICK LMS200) is selected to combine with an additional step drive to reach a 3D sensor. The sources of systemic errors are analyzed, a method of error correction is proposed, and the accurate calculation formulas of 3D coordinates are given. The experimental results show that the system has higher measuring accuracy and data quality. The maximum range of the system is 80 m, measurement accuracy can achieve 6 mm. It can collect 7256 points in a second to meet the needs of fast capturing 3D data from indoor and outdoor scene, and then its cost is only 4 times lower than that of current commercial 3D laser scanners. It is easy to carry for small size and light weight.

Key words applied laser; 3D LIDAR; synchronous control; error correction

1 引言

三维激光雷达技术是近十年迅速发展起来的新型遥感技术,全天候、实时、主动、快速、准确、直接获取大范围地表及地物高密度三维数据,在一定程度上解决了城市规划、国土调查、数字森林、数字电力、数字交通、文物数字保护、应急减灾、矿产调查等应用领域的的数据需求。然而,商业三维激光雷达价格

十分昂贵,地面三维激光雷达的价格约在 130 万人民币左右,航空三维激光雷达的价格约在 1500 万人民币左右。截至目前,国内市场没有国产的三维激光雷达产品,国外商业中远距离三维激光雷达生产厂商也并不多,典型生产厂家有 6 家:德国的 Callidus、美国的 CYRA、法国的 MENSI、德国的 RIEGL、加拿大的 OpTech 及澳大利亚的 I-SiTE 等

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC40601081)、北京市科技新星(2006B57)和博士学科点基金新教师项目(20070006031)资助课题。

作者简介: 胡少兴(1972—),男,副教授,主要从事三维激光雷达及其应用处理技术、计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail: husx@buaa.edu.cn

公司。三维激光雷达虽好,但由于价格等因素,很难在国内推广使用。因此,研究开发价格低廉性能好的自主知识产权的三维激光雷达有着十分重要的现实意义和巨大的应用市场。

本文设计与开发一种低成本 360°连续扫描的便携式三维激光雷达系统,在一秒内采集 7256 个点的三维信息,满足室内室外大规模场景三维数据快速获取的需求,而成本仅是目前国外同类商业三维激光雷达价格的五分之一左右。本文包括三个主要部分:1) 360°连续扫描的便携式三维激光雷达系统设计;2) 360°连续扫描的便携式三维激光雷达误差校正;3)实验结果分析。

2 便携式三维激光雷达系统设计

国外三维激光雷达技术已经有了长足的发展,国内对该领域的研究还处于起步阶段。本文利用 SICK LMS200 和 SICK LMS291 开发出一套各项指标与国外同类先进产品相当的适合室内室外数据采集的中近距离便携式三维激光雷达系统。



图1 便携式三维激光雷达原形系统

Fig. 1 Portable 3D lidar prototype system

便携式三维激光雷达系统主要由一个二维激光扫描仪(SICK LMS200 和 SICK LMS291)与高精度旋转台、连接件以及步进电机所组成。二维激光扫描仪通过一个精密加工的连接工件与高精度旋转台连接,并由步进电机驱动形成三维扫描,如图 1 所示。三维激光雷达水平扫描范围大于 360°,垂直扫描范围 180°,恰好形成了闭合球面的扫描区域。这里,精密加工的连接件保证了二维激光扫描仪棱镜旋转中心与转台旋转中心重合。

SICK LMS200 和 SICK LMS291 可形成 180°与 100°的两种模式的扫描扇面,扫描扇面内采样分辨率可设置为 0.25°、0.5°、1°,最远扫描距离为 80 m。扫描精度为 mm 级。扫描波特率分为 9600 K、19200 K、38400 K、500 K。SICK LMS200 和 SICK LMS291 是通过串口与计算机通信的,其最快速度

为 75 次/秒,而内部的缓存容量是有限的(max. 812 bytes),如果不及时传输出扫描数据,缓存就会自动刷新,从而丢失了部分数据。普通串口即计算机自带串口 RS232 的最大通信波特率达不到传输要求(500 K Baud),不能够完全传输数据,所以本文通过在计算机内插入具有 PCI 接口的 Quatech 卡,转换出两个 RS422 口,使传输波特率达到 500 K baud。高精度旋转台则通过 RS232 与计算机通信。图 2 表示便携式三维激光雷达系统结构。

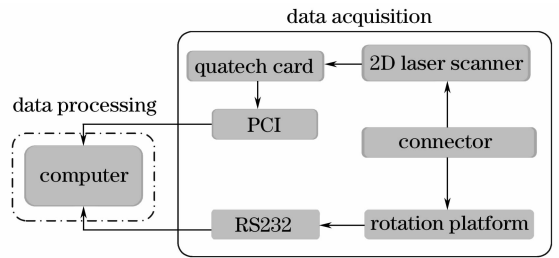


图2 便携式三维激光雷达系统结构图

Fig. 2 Structure of portable 3D lidar prototype system

每次开始采集时,为满足一定测量分辨率的需要,由人工选取参数,并将参数字符串转化成控制信号为 16 进制的数组,通过 RS422 口传输给二维激光扫描仪。初始化需要一定的时间,时间的长短与选取的波特率有关,约在 4~11.5 s 之间。同样,转台也有一段初始化时间,使转台达到匀速转动。因此,二维激光扫描仪与高精度旋转台同步采样是二维激光扫描形成三维激光扫描的关键。

3 便携式三维激光雷达误差校正

二维激光扫描仪在垂直方向上的扫描和旋转台在水平方向上的旋转形成三维数据,如图 3 所示。

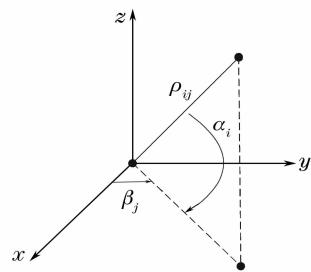


图3 三维激光雷达坐标系示意图

Fig. 3 Sketch of portable 3D lidar coordinates

ρ_{ij} 为激光采样点到三维激光雷达旋转中心的距离值,单位可以是 mm、cm 或 m, α_i 为三维激光雷达垂直扫描角,即二维激光扫描仪旋转棱镜的旋转角; β_j 为三维激光雷达水平扫描角,即转台的旋转角。如果不考虑误差影响,输出的三维点云坐标为

$$\begin{cases} x_{ij} = \rho_{ij} \cos \alpha_i \cos \beta_j, \\ y_{ij} = \rho_{ij} \cos \alpha_i \sin \beta_j, \\ z_{ij} = \rho_{ij} \sin \alpha_i. \end{cases} \quad (1)$$

事实上,便携式三维激光雷达存在系统误差:1)安装误差 l ,即二维激光扫描仪与高精度转台在连接安装时造成二维激光扫描仪旋转棱镜中心与转台回转中心不重合,偏差 l 长的距离;2)测距误差 $\Delta\rho$,由于物体表面特性、空气湿度、仪器内部时间计量器与反射能量等因素造成;3)扫描角度误差 φ ,主要因为转台从启动到匀速转动有一段时间间隔,造成实际参考方向(0° 方向)与坐标轴不重合,从而带来测量误差。因此,(1)式修正为

$$\begin{cases} \hat{x}_{ij} = (\rho_{ij} + \Delta\rho) \cos \alpha_i \cos(\beta_j + \varphi) + l \cos(\beta_j + \varphi) \\ \hat{y}_{ij} = (\rho_{ij} + \Delta\rho) \cos \alpha_i \sin(\beta_j + \varphi) + l \sin(\beta_j + \varphi), \\ \hat{z}_{ij} = (\rho_{ij} + \Delta\rho) \sin \alpha_i. \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ_{ij} 、 α_i 、 β_j 已知, $\Delta\rho$ 、 l 和 φ 未知需要进一步标定的校正参数。

为了标定 $\Delta\rho$ 、 l 和 φ 的值,本文采用平板标定方法,制作 5 块平板,与实际参考坐标系的 x 轴、 y 轴的正负向垂直处各布置 2 块平板(平板 1 和平板 2;平板 3 和平板 4),与 Z 轴正向处置处布置 1 块平板(平板 5)。这样,落在平板 1 的激光点的 X 坐标精确可知,即 $x=L_1$ 。同理,落在平板 2 的激光点的 x 坐标等于 $-L_2$;落在平板 3 的激光点的 y 坐标等于 L_3 ;落在平板 4 的激光点的 y 坐标等于 $-L_4$;落在平板 5 的激光点的 z 坐标等于 L_5 。 $L_1 \sim L_5$ 为

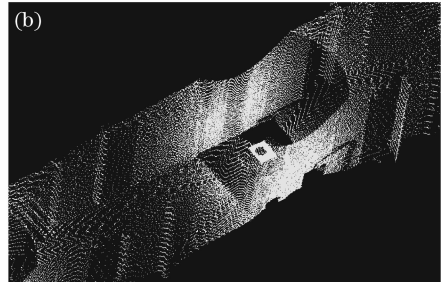
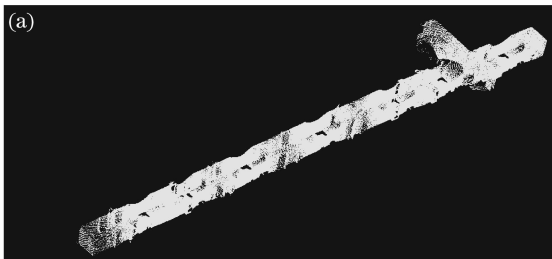


图 5 走廊三维点云数据。(a)走廊三维点云数据,(b)走廊三维点云数据放大效果
Fig. 5 3D point cloud of a corridor. (a) 3D point cloud of a corridor, (b) larger effects of (a)

图 6 是利用便携式三维激光雷达获取的北航新主楼外场景的三维点云数据。左边是场景图片,右边是获取的三维激光点云数据。在三维点云图中,灯、树干、树枝看得非常清楚。

平板到实际参考坐标系原点的垂直距离,在标定过程中移动平板改变 L_n 值,得到一组方程,利用附加参数进行平差计算,并由显著性测试检验校正参数的显著性,从而求解个校正参数。

4 实验结果分析

利用本文开发的便携式三维激光雷达测量建筑物的楼面如图 4,从放大的部分可以看出,激光采样点的排列顺序整齐,且在平面上点云数据波动范围十分小,说明通过标定便携式三维激光雷达各项参数指标的精度达到了一般测量需要。

图 5 是利用便携式三维激光雷达获取的三维信息获取与应用教育部重点实验室小楼二层走廊三维点云数据。并将获取的三维数据倒入 Imageware 软件中进行拼接。便携式三维激光雷达的作用范围是 0.2~80 m,最佳范围在 0.2~40 m,非常适合室内及长廊与隧道三维数据采集。

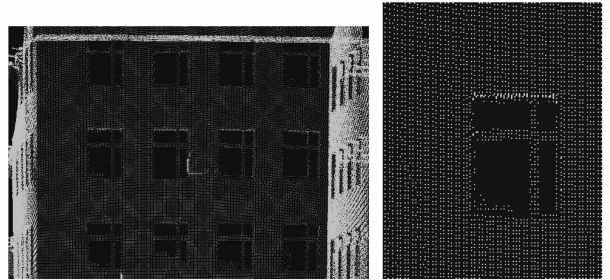


图 4 平面测试
Fig. 4 Plane test

图 7 是利用便携式三维激光雷达获取的室外局部扫描数据,并根据距离远近进行了伪彩色处理,更加清楚地显示了场景中各元素的三维形态。

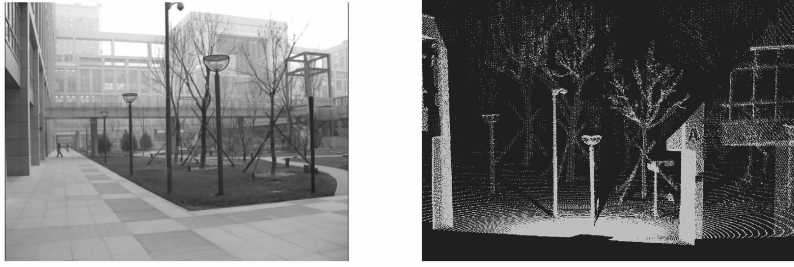


图6 北航新主楼外场景的三维点云数据

Fig. 6 3D point cloud of the new main house scene in Beijing University of Aeronautics and Astronautics

5 结 论

本文开发了一种360°回转扫描的便携式三维激光雷达,可用于城市规划、工业测量、虚拟现实和文物数字化保护、轨道交通等领域。它的各项指标与国外同类产品比较如表1。可以看出本文开发便携式三维激光雷达(AX-LMS200)系统性价比已经达到了国外同类产品的指标,且体积小重量轻,仅有5 kg,便于携带。下一步将在三维激光雷达外置高分辨率数码相机,实现激光数据与可见光图像数据的融合,并进一步完善系统,实现多站点三维激光数据自动拼接与平差。



图7 伪彩色显示

Fig. 7 Pseudo-color display

表1 与国外同类产品技术参数比较

Table 1 Comparison with foreign products in the technical parameters

Type	Callidus	Cyrax2500	I-SiTE	GS 100	ILIRIS-3D	LMS-Z420	AX-LMS200
Laser class	1	2	1	2	1	1	2
Wavelength /nm	905	532	904	532	1540	904	532
Measurement range /m	80	100	450	100	800	200	80
Accuracy /mm	5(30 m)	6(50 m)	8(300 m)	6(100 m)	7(100 m)	10(100 m)	6(32 m)
Measurement rate /pts	3300	1000	6000	1000	2000	9000	7256
Vertical scanning range /(°)	360	40	340	360	40	360	360
Vertical scanning range /(°)	180	40	80	60	40	80	180

参 考 文 献

- Paulo Dias. 3D reconstruction of real world scenes using a low-cost 3D range scanner [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, **21**: 486~497
- F. Gielsdorf, A. Rietdorf, L. Gruending. A concept for the calibration of terrestrial laser scanners[C]. *In Proc. of FIG Working Week*, Athens, Greece, 2004
- G. S. Cheok, S. Leigh, A. Rukhin. Calibration experiments of a laser scanner[R]. US National Institute of Standards and Technology, Report No NISTIR 6922, 2002
- A. Nüchter, Kai Lingemann, J. Hertzberg *et al.*. 6D SLAM-3D mapping outdoor environments[J]. *J. Field Robotics*, 2007, **24**(8/9): 699~722
- O. Wulf, A. Nüchter, J. Hertzberg *et al.*. Ground truth evaluation of large urban 6D SLAM [C]. *In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '07)*
- Xu Peisheng, Tang Xinnian, Na Ri *et al.*. Study on welded seam recognition using circular laser vision sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 328~332

- Yu Zujun, Yang Yanan, Zhu Liqiang. Study on calibration method for 3-D laser scanning systems [J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2007, **21**(6): 31~34
- 余祖俊,杨娅楠,朱力强. 三维激光扫描测量系统标定方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2007, **21**(6): 31~34
- Xu Zhiqin, Sun Changku, Tao Li *et al.*. Study on color three-dimensional laser scanning measuring method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 1008~1012
- 许智钦,孙长库,陶立等. 彩色三维激光扫描测量方法的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 1008~1012
- Li Ziqin, Li Qi, Wang Qi. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1081~1085
- 李自勤,李琦,王骥. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1081~1085
- Xu Zhiqin, Sun Changku, Zheng Yizhong. Structure parameters' optimization design of the color 3D laser scanning measurement system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(9): 839~842
- 许智钦,孙长库,郑义忠. 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 839~842