

车载激光点云与序列化全景影像融合方法

卢秀山^{1,2}, 俞家勇², 田茂义², 刘如飞^{2*}, 石波², 李鹏飞²

¹ 山东科技大学海洋工程研究院, 山东 青岛 266590;

² 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要 利用车载移动测量系统采集的全景影像, 建立全景球坐标系。将车载点云通过一系列的坐标转换, 在全景球坐标系下利用球心、球面上像点和球面上物点三点共线关系, 实现车载移动测量系统激光点云与全景影像的融合。全景影像拍摄盲区造成真彩点云存在“黑洞”, 从而导致路面信息缺失。针对该问题利用相邻影像重叠关系对“黑洞”进行修补。通过人工采集检查点对融合精度进行评定, 结果表明, 该方法融合结果正确, 全景影像与激光点云融合精准, 修补“黑洞”后, 路面信息保留完整。

关键词 传感器; 车载移动测量系统; 全景影像; 球系共线方程; 真彩点云

中图分类号 P237

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510004

Fusion Method of Vehicle Laser Point Cloud and Serialized Panoramic Image

Lu Xiushan^{1,2}, Yu Jiayong², Tian Maoyi², Liu Rufe², Shi Bo², Li Pengfei²

¹ Institute of Ocean Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

² College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract We build a panoramic spherical coordinate system using the panoramic images collected by vehicle mobile measurement system. The fusion of the laser point cloud and panoramic images is realized through a series of coordinate transformation of vehicle points based on collinear principle of center of sphere, image point and object point of spherical surface. The black hole of true color point cloud caused by the blind area of panoramic images creates the road information loss, we use the overlapping relationship of adjacent images to solve the black hole. Precision evaluation is conducted via manual information collection. We use the manual collection checkpoints to evaluate the fusion accuracy, and the results show that the fusion method is correct and precision. The road information is preserved completely after repairing the black hole by accurate collection of panoramic images and laser point cloud.

Key words sensors; vehicle mobile measurement system; panoramic image; spherical collinear equation; true color point cloud

OCIS codes 280.3420; 120.0280

1 引 言

车载移动测量系统采用的传感器主要包括惯性导航系统、工业 CCD 相机、全景相机、三维激光扫描仪、里程计等。系统中的三维激光扫描仪可以获取具有空间位置信息的激光点云, 全景相机可以获得

具有纹理信息的全景影像。两者在对目标的定性描述上有诸多的互补性, 将激光点云与全景影像进行融合, 能够得到信息更加丰富的真彩点云。激光点云与影像融合方法目前主要包括共线方程法、直接线性变换法、角锥体法等^[1-2]。随着技术的发展, 全景相机越来越广泛地应用于车载移动测量系统中,

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ120343)、海洋公益性行业科研专项(201305034-1)、测绘公益性行业科研专项(201512034)

作者简介: 卢秀山(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代测量数据处理理论及应用和“3S”集成技术及应用等方面的研究。E-mail: xiushanl@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: liurufe_2007@126.com

主要用于量测、建模、数据采集,其优势在于成像一体化、360°大视场、旋转不变性等,不存在场景缺失和场景拼接问题^[3-9]。在车载移动测量系统中,要实现全景影像与激光点云数据的高精度融合,关键在于保证各传感器设备轴系空间位置关系标定准确、各传感器设备高精度同步工作、姿态数据与位置信息的高精度获取等^[10-15]。随着硬件的发展和检校技术的突破,前述因素的影响越来越小^[16-19]。在早期的移动测量产品中,采用多面阵相机组合方式进行全景影像采集,标定时需要对每个单相机进行内参与外参标定,通过柱面或者球面投影方式进行全景影像生成^[20-23]。这类方法的应用过度依赖于传感器结构,标定工作烦琐,部分融合配准建立在传统的单面阵影像基础之上。随着技术发展,一体化全景设备在移动测量系统中得到广泛运用,对应的标定方式与融合方法也得到了发展与简化。通过将全景影像看作一个整体,直接对利用全景相机生成的球形投影影像进行标定、融合,以及后期深度应用^[24-27]。这类方法脱离了传感器结构的束缚,可以简化标定过程,能够充分体现全景影像优势,通过建立全景影像与全景球模型对应关系实现融合与应用。但在这些研究范围内,均未考虑全景设备视场角限制及因全景设备安装需求而造成的全景影像盲区问题。在

此基础上,本文利用定位定姿系统(POS)数据和各传感器间的相对空间位置关系建立激光点云与全景球模型之间的转换关系,给出球坐标系下共线方程式,根据全景球心、球面上像点、球面上物点三点共线条件,实现车载激光点云与全景影像的高精度配准。考虑到全景相机盲区造成的路面信息缺失,对算法进行规避和修补,最终得到逼真、精准的真彩点云。

2 基于序列化全景影像的激光点云融合

车载移动测量系统受定位定姿方式影响,所采集的三维激光点云初始坐标系为世界大地坐标系。为了能将全景影像与激光点云进行融合,首先需要对点云进行一系列转换,利用共线关系进行匹配融合。根据单张全景影像覆盖范围确定融合区域,利用时间分段实现序列化全景影像与激光点云的融合。

2.1 融合坐标变换

在激光点云与影像融合过程中,需要经过多个坐标系变换,以转至同一坐标系,利用共线条件求解像点坐标,从而获得激光点对应颜色值进行融合。整个变换过程如图1所示。

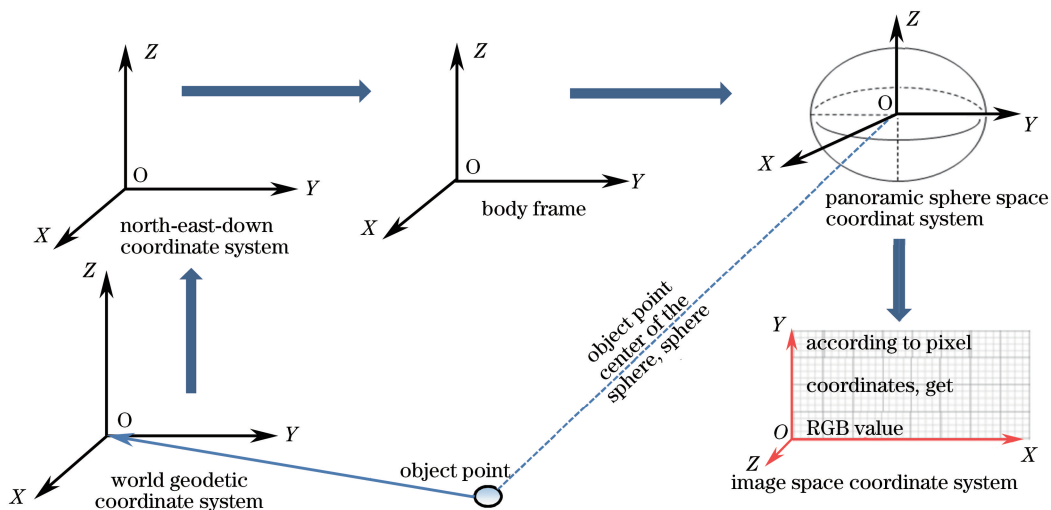


图1 融合过程坐标系变换示意图

Fig. 1 Schematic of coordinate system transformation for fusion process

将转换过程详细分解成以下4个步骤。

1) WGS84坐标系下点云点转至当地水平坐标系。设物点(激光点云点)在世界大地坐标系下的坐标为 $(X, Y, Z)_{WGS84}$, 对应照片拍摄时刻对应的位置为 $(X, Y, Z)_O$, 全景照片拍摄时刻对应大地坐标 (B, L, H) , 则世界大地坐标系下物点转为当

地水平坐标系下的坐标 $[(X, Y, Z)_{Local}]$ 的计算公式为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Local}^T = \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84}^T - \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_O^T \right] \mathbf{R}_{WGS84}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_{\text{WGS84}} = \begin{pmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix}. \quad (2)$$

2) 当地水平坐标系物点转至惯性测量单元(IMU)坐标系。转至当地水平坐标系下后,根据全

景照片拍摄时刻对应的姿态角[横滚角、俯仰角、偏航角分别为 $(\varphi, \omega, \kappa)$],将当地水平坐标系下的坐标转换为 IMU 坐标系下的坐标 $(X, Y, Z)_{\text{IMU}}$:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{IMU}}^{\text{T}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{Local}}^{\text{T}} \mathbf{R}_{\text{Local}}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Local}} = \begin{cases} \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa & -\sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & \sin \omega \\ \sin \varphi \cos \kappa - \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\sin \varphi \sin \kappa - \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa & \cos \varphi \cos \omega \end{cases}. \quad (4)$$

3) IMU 坐标系转至全景球坐标系,利用共线方程求解球面点坐标,如图 2 所示。车载移动测量系统中,各传感器之间的轴系空间位置关系已进行严格标定。IMU 坐标系到全景球坐标系转换主要包括 6 个参数:3 个旋转角 (α, β, γ) 和 3 个平移量

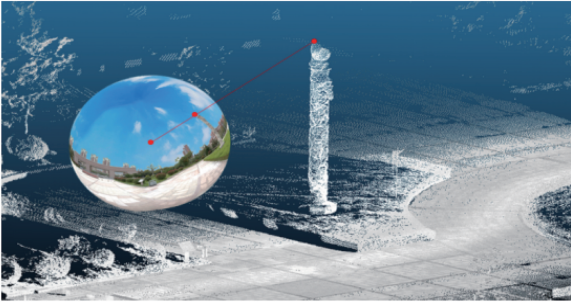


图 2 球坐标系下共线关系

Fig. 2 Collinear relationship in spherical coordinate system

$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_C$ 。全景球坐标系定义:以全景球球心为坐标系原点 O_S ,Y 轴指向车行方向,X 轴指向车体右侧,Z 轴垂直向上, O_S-XYZ 构成全景球空间坐标系。设全景球坐标为 $(X_S, Y_S, Z_S)_S$,在 IMU 坐标系下的坐标为 $(X, Y, Z)_{\text{IMU}}$,通过平移和旋转,得到全景球坐标下激光点坐标,然后利用共线方程式,求解对应的球面点坐标。

球坐标系下共线条件方程式为

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix}_S^{\text{T}} = \left\{ \begin{bmatrix} (X)_{\text{WGS84}}^{\text{T}} \\ (Y)_{\text{WGS84}}^{\text{T}} \\ (Z)_{\text{WGS84}}^{\text{T}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (X)_{\text{O}}^{\text{T}} \\ (Y)_{\text{O}}^{\text{T}} \\ (Z)_{\text{O}}^{\text{T}} \end{bmatrix} \right\} \mathbf{R}_{\text{WGS84}} \mathbf{R}_{\text{Local}} - \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_C^{\text{T}} \left\} \mathbf{R}_C \frac{r}{R}, \quad (5)$$

式中 R 为物点到球心的距离, r 为自定义全景球半径。

$$\mathbf{R}_C = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

4) 获取球面坐标对应 RGB 值。至此,完成激光点与全景球面点之间的转换。通常采集的全景影像为平面形式,为获得对应 RGB 值,还须将全景球面点还原到像空间坐标系下,根据像素点坐标系获得 RGB 值,转换如图 3 所示。

全景球与全景影像变换关系为

$$\theta = \arccos \left(\frac{Z_S}{\sqrt{X_S^2 + Y_S^2 + Z_S^2}} \right) = \frac{y_p}{r}, \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan 2 \left(\frac{Y_S}{X_S} \right) = \frac{x_p}{r}, \quad (8)$$

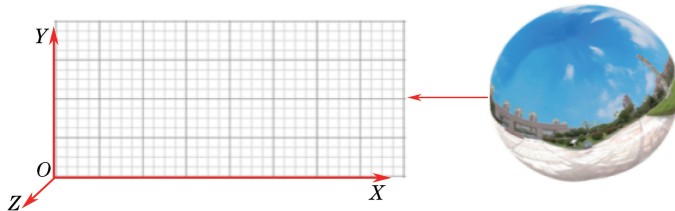


图 3 全景球与全景影像变换

Fig. 3 Panoramic sphere and panoramic image transformation

式中 x_p, y_p 为全景影像对应的像点坐标, r 为自定义全景球半径。

2.2 基于时间序列的影像匹配融合

在数据采集时,设置全景相机 T_s 曝光一次进行影像数据采集。因为点云是连续的,而影像是有间隔的,为保证所有激光点云都能附上真彩色,于是以影像曝光时间为中点,假设采样间隔为 2 s,以某张影像为例,首先获取该影像曝光时间 S ,以曝光时间 S 为基础,将向前向后各 1 s,即 $[S-1, S+1]$ 时间段内所采集的点云均认作是与这张影像匹配的。在循环读取点云数据时,根据点云记录时间,找到对应全景影像附色区间,进行匹配附色。如果没有匹配到对应影像附色区间,则该时刻点云没有全景影像对应。这种现象一般是因为影像丢失等因素所引起的。如果没有匹配影像,则该点不附颜色,继续下一点附色工作,时间匹配如图 4 所示。

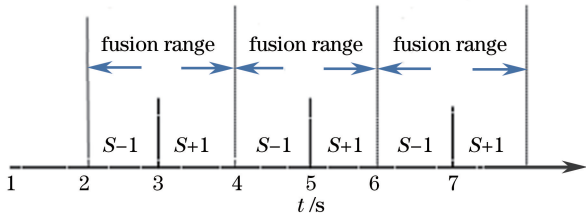


图 4 基于时间序列的影像匹配

Fig. 4 Image matching based on time series

2.3 黑洞修补

经过上述匹配融合后,激光点云和全景影像融合的真彩点云成果如图 5 所示。可以看出,激光点云能够和全景影像纹理信息很好地融合,附色准确。然而也不难发现,真彩点云中存在黑洞现象。这是因为采用的全景拍摄设备为 ladybug5,由于相机自身视角局限及安装的需要,设备拍摄影像视场覆盖范围为 90%,未覆盖区域即为设备盲区,在球形投影上表现为一个天底洞,将球形全景重新投影展开后,影像无法覆盖部分用黑色影像填充,如图 6 所示。

设黑洞半径为 R_H , r 为自定义全景球半径,则球系下盲区范围为

$$\begin{cases} \{X \mid -R_H < X < R_H\} \\ \{Y \mid -R_H < Y < R_H\} \\ \{Z \mid Z < -\sqrt{r^2 - R_H^2}\} \end{cases} \quad (9)$$

从图 5 可以看出,真彩点云中存在一系列连续黑洞,且黑洞与影像位置相对应。真彩点云中黑洞现象的存在,会造成路面信息的大量缺失,特别是针对利用车载移动测量系统进行道路信息采集的相关

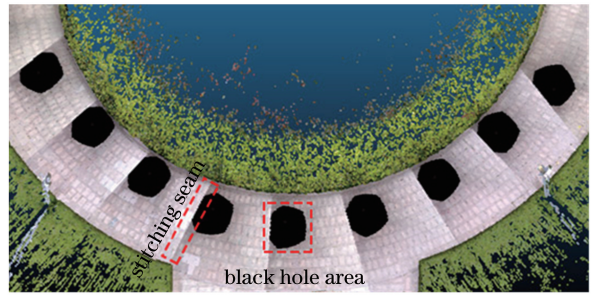


图 5 具有黑洞与拼接缝的真彩点云

Fig. 5 True color point cloud with black holes and stitching seam

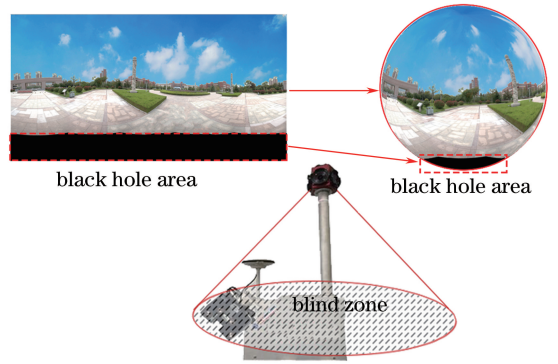


图 6 全景球黑洞区域

Fig. 6 Black hole area of panoramic ball

应用,缺失的信息尤为重要。所以,必须要对黑洞进行修补。此外,从图 5 还可以清楚看见两张影像间存在明显的拼接缝,这是由于全景照片各个位置受太阳位置影响,曝光不一致而产生的。此外,由于全景相机顶部和底部的曝光也不一样,在黑洞修补时也会存在拼接缝,须对拼接缝进行匀光。根据设备和黑洞在影像中所占区域,定义盲区范围(图 7 中矩形区域)。



图 7 盲区定义

Fig. 7 Definition of blind zone

在点云与影像数据的融合过程中,根据相邻影像重叠关系,对附色为黑洞区域的路面点云,重新投影至相邻影像非黑洞区域进行附色,达到保留路面信息的目的,该方法融合的精淮度主要依赖于影像

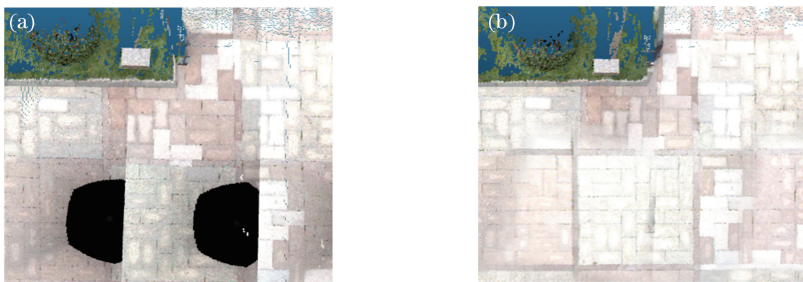


图 8 黑洞修补(a)前和(b)后对比

Fig. 8 Comparison of black hole (a) before and (b) after repair

重叠率、设备标定精度、设备同步精度。考虑到全景影像不同区域曝光度不一致造成的真彩点云拼接缝问题,在查找到黑洞区域对应的相邻影像时,对该区域和原图像进行匀光,调整黑洞边缘。

3 融合成果与精度评定

3.1 实验结果

为检验融合算法的正确性与准确度,使用青岛

秀山移动测量有限公司研发的 VSurs-Q 轻便型移动测量系统对某广场和道路进行数据采集。第一组是对某广场进行数据采集,测区天空空旷,有花坛、立柱、灯杆等构筑物,采集数据时对载体机动灵活性要求较高,需要在较窄的道路来回穿插。设备采集数据主要有激光扫描仪数据、全景影像数据、同步数据、POS 数据等,采集时间为 13:00 左右,融合成果如图 9 所示。

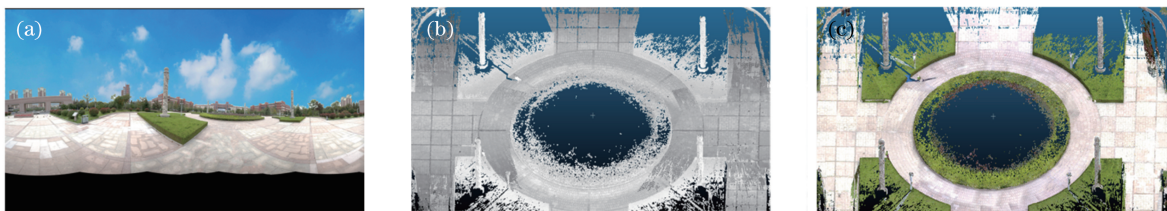


图 9 最终融合成果。(a)全景图像;(b)渲染强度;(c)真彩点云

Fig. 9 Final integration results. (a) Panoramic image; (b) render by intensity; (c) true color point cloud

从图 9 可以看出,本文方法能够完成序列影像融合,同时能够解决路面信息缺失问题,没有缺失、遗漏、错位现象。但仔细观察发现,在黑洞修补区域存在明暗过渡的印记。这是由于采集时间太阳高度角较高,部分区域邻近照片修补处曝光不一致,算法还未能较好地完成匀光过渡。

第二组是针对某道路进行数据采集,道路两侧行道树较多,高楼林立,道路为东西走向,采集时间为上午 8:20 左右,数据融合成果见图 10。数据采集时太阳位于东边,太阳高度角较低,在全景采集照片前进方向曝光略高,后方光照度略低,故在两张照片附色分割区域形成一条明显的分割线,人行横道区域同样也可以看出明暗分割线。从图 11 可以看出,在两张照片分割区域中,人行横道线并未出现明显错位,说明本文算法比较精准。

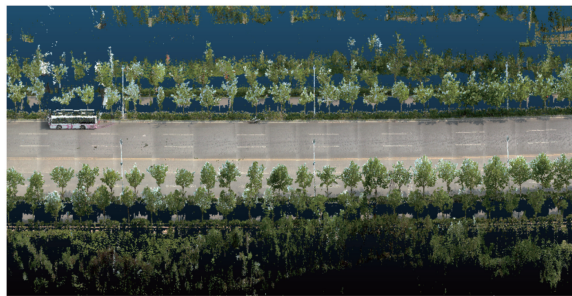


图 10 道路真彩点云

Fig. 10 True color point cloud of the road

从上述结果可以看出,本文算法融合结果正确,附色准确,能够较好地修补黑洞,解决路面信息缺失问题,完整保留路面信息。但在匀光处理上稍有不

足,通过对比与实验分析可知,如果要获得比较好的逼真的真彩点云数据,须对采集时间进行约束,避免早上、傍晚,以及中午 12:00 左右,即太阳高度角过高或者过低的时刻。

3.2 精度评定

为了对融合精度进行评定,抽取多张全景影像,人工从中任意提取 20 个像点作为检查点,并从点云数据中选取 20 个对应的检查点,点位均匀分布在全

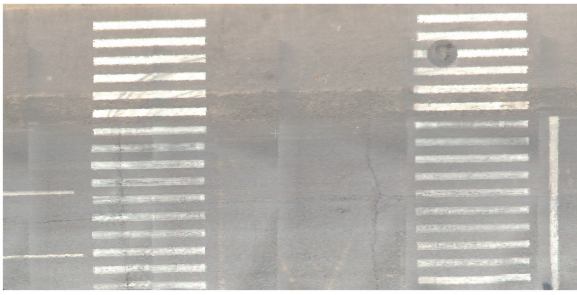


图 11 道路局部视图

Fig. 11 Partial view of the road

景相机周围,距离拍摄中心 10~15 m,利用本文方法,计算 20 个检查点对应在影像上的像点坐标,并与人工提取得到的像点坐标进行融合误差分析。数据比对如表 1 所示。

表 1 融合精度对比

Table 1 Comparison of fusion accuracy pixel

Point number	Pixel coordinates		Object pixel coordinates		Error	
	x	y	x'	y'	dx	dy
1	7793	2481	7794.34	2481.21	-1.34	-0.21
2	7545	1249	7546.28	1250.37	-1.28	-1.37
3	5121	1305	5119.55	1303.99	1.45	1.01
4	4393	2137	4392.96	2135.49	0.04	1.51
5	3985	1369	3986.05	1367.48	-1.05	1.52
6	1809	1617	1807.6	1618.22	1.4	-1.22
7	1645	2433	1646.36	2432.27	-1.36	0.73
8	769	1649	770.37	1647.45	-1.37	1.55
9	7457	2329	7455.947	2329.62	1.053	-0.62
10	5785	2121	5785.8	2119.99	-0.8	1.01
11	2825	2297	2826.1	2295.92	-1.1	1.08
12	5297	1497	5297.92	1495.73	-0.92	1.27
13	3321	1753	3321.97	1751.7	-0.97	1.3
14	1553	1865	1552.31	1863.53	0.69	1.47
15	7705	2425	7704.98	2425.75	0.02	-0.75
16	6577	2313	6575.96	2314.43	1.04	-1.43
17	3897	1521	3895.85	1519.63	1.15	1.37
18	3297	1537	3295.82	1535.71	1.18	1.29
19	2329	2273	2328.02	2274.46	0.98	-1.46
20	505	1495	506.74	1493.78	-1.74	1.22

因受物点提取精度与影像分辨率等因素制约,物点提取范围是在影像曝光位置周围 15 m 左右。从表 1 可以看出,车载移动测量系统中激光点云数据与全景影像数据融合结果整体误差在 1~2 pixel,与检校精度相当。由此可见,本文方法融合结果正确,附色计算准确。

4 结 论

全景影像与车载点云融合的关键在于高精度的

时间同步,以及各个传感器设备之间空间位置关系的高精度标定。在传统摄影测量基于平面共线方程的基础上,利用全景影像生成虚拟全景球,根据摄影时刻全景球心,以及全景球面上的像点、物点之间的三点共线关系,给出全景球坐标系下的共线方程式。根据影像姿态信息数据和各个传感器之间的相空间位置关系,通过坐标变换与共线关系,实现车载激光点云与全景影像融合。针对全景盲区导致的真彩点云黑洞问题,采用黑洞修补方法,解决路面信息丢失问题,实现真彩点云快速、精准生成。所生成的真彩点云在三维空间信息获取、场景真实还原、道路信息采集等领域具有应用潜力。

致谢 感谢青岛秀山移动测量有限公司提供设备支持。

参 考 文 献

- [1] Wang Z Z. Photogrammetry principle[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1979: 50.
王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979: 50.
- [2] Zhang J Q, Pan L, Wang S G. Geo-spatial information science[M] Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [3] Ji S P, Shi Y. Image matching and bundle adjustment using vehicle-based panoramic camera [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 94-100.
季顺平, 史云. 车载全景相机的影像匹配和光束法平差[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 94-100.
- [4] Fangi G. The multi-image spherical panoramas as a tool for architectural survey [C]. XXI International CIPA Symposium, 2007.
- [5] Parian J A, Gruen A. Sensor modeling, self-calibration and accuracy testing of panoramic cameras and laser scanners [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2010, 65(1): 60-76.
- [6] Fangi G, Nardinocchi C. Photogrammetric processing of spherical panoramas [J]. Photogrammetric Record, 2014, 28(143): 293-311.
- [7] Sun Z X, Zhong R F. Measurement scheme for panoramic images [J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(4): 399-406.
孙振兴, 钟若飞. 一种用于全景影像的测量方案[J]. 应用科学学报, 2015, 33(4): 399-406.

- [8] Sun M, Dong N, Yu J L, *et al.* A method of building a measurable stereoscopic panorama [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(s1): 301-303.
孙敏, 董娜, 余京蕾, 等. 一种可量测立体全景的构建方法[J]. *测绘通报*, 2012(s1): 301-303.
- [9] Cheng X J, Cheng X L, Hu M J, *et al.* Buildings detection and contour extraction by the fusion of aerial images and LIDAR point cloud [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514002.
程效军, 程小龙, 胡敏捷, 等. 融合航空影像和LIDAR点云的建筑物探测及轮廓提取[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514002.
- [10] Li M L, Gao X Y, Li G Y, *et al.* High accuracy calibration of installation parameters between 3D terrestrial laser scanner and external-installed digital camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2158-2166.
李明磊, 高欣圆, 李广云, 等. 地面三维激光扫描仪与外架数码相机间安置参数的高精度标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2158-2166.
- [11] Feng W J, Zhang B F, Rönning J, *et al.* Panoramic stereo sphere vision [C]. *SPIE*, 2013, 8662: 866206.
- [12] Liu S, Chen J, Sun M, *et al.* Measurable panorama construction based on binocular spherical projective geometry [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2015(4): 657-665.
刘帅, 陈军, 孙敏, 等. 双球面投影几何可量测全景模型的构建 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015(4): 657-665.
- [13] Ji S P, Shi Y. Comparison of two sensor models for multi-camera rig system in measurements [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1252-1258.
季顺平, 史云. 多镜头组合型全景相机两种成像模型的定位精度比较 [J]. *测绘学报*, 2014, 43(12): 1252-1258.
- [14] Zhang C, Yang H M, Han C, *et al.* Multi-camera calibration based on vanishing point constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0512004.
张超, 杨华民, 韩成, 等. 基于消失点约束的多相机标定方法 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0512004.
- [15] QI Z S, Wang Z, Huang J H, *et al.* Research on system calibration of structured-light measurement based on neural network [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0512002.
齐召帅, 王昭, 黄军辉, 等. 基于神经网络的结构光系统标定 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0512002.
- [16] Lu X S, Zheng Z Y, Wang D, *et al.* Evaluating on theoretical accuracy of 3Dsurs system scanner point [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 202-206.
卢秀山, 郑作亚, 王冬, 等. 3Dsurs系统激光扫描点的理论精度评定 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(2): 202-206.
- [17] Wang L, Li G Y, Yang X Y, *et al.* One-site calibration of mounted parameter method for 3D mobile laser scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1106005.
王力, 李广云, 杨新永, 等. 车载三维激光扫描系统安置参数一站式标定 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1106005.
- [18] Wang D, Lu X S. Realization of multi-coordinate system conversion on vehicle-borne 3D information acquisition system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(4): 35-37, 193.
王冬, 卢秀山. 车载式三维信息采集系统中多坐标系统转换实现 [J]. *测绘科学*, 2007, 32(4): 35-37, 193.
- [19] Shi L M, Zhao H R, Li M H, *et al.* Extrinsic calibration for vehicle-based mobile mapping system [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(1): 52-58.
石丽梅, 赵红蕊, 李明海, 等. 车载移动测图系统外方位元素标定方法 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(1): 52-58.
- [20] Wang D, Liu F Y, Chen T E, *et al.* The method of cylinder panoramic image based on camera calibration parameters [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(7): 150-154.
王冬, 刘凤英, 陈天恩, 等. 一种相机标定参数的柱面全景影像拼接方法 [J]. *测绘科学*, 2016, 41(7): 150-154.
- [21] Yan L, Cao L, Chen C J, *et al.* Registration of vehicle-borne panoramic image and LiDAR point cloud [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(3): 32-36.
闫利, 曹亮, 陈长军, 等. 车载全景影像与激光点云数据配准方法研究 [J]. *测绘通报*, 2015(3): 32-36.
- [22] Nie Q, Cai Y B, Lin Y, *et al.* Registration of vehicle-borne laser point clouds and panoramic images [J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(1): 15-18, 22.
聂倩, 蔡元波, 林响, 等. 车载激光点云与全景影像的配准研究 [J]. *遥感信息*, 2014, 29(1): 15-18, 22.
- [23] Chen W M, Nie Q, Lin Y. Research on registration of vehicle-borne laser point clouds and panoramic images based on Lodrigues matrix transformation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(11): 21-24.
陈为民, 聂倩, 林响. 基于罗德里格矩阵的车载激光点云与全景影像配准研究 [J]. *测绘通报*, 2013(11):

- 21-24.
- [24] Cui T, Ji S, Shan J, *et al.* Line-based registration of panoramic images and LiDAR point clouds for mobile mapping[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 70.
- [25] Zeng F Y, Zhong R F, Song Y, *et al.*, Vehicle panoramic image matching based on epipolar geometry and space forward intersection[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(6): 1230-1236.
曾凡洋, 钟若飞, 宋杨, 等. 车载全景影像核线匹配和空间前方交会[J]. *遥感学报*, 2014, 18(6): 1230-1236.
- [26] Song Y, Zeng F Y, Li C H, *et al.* The true-color point-cloud algorithm based on collinear principle and panoramic image [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015(4): 1-5, 10.
宋杨, 曾凡洋, 李长辉, 等. 基于共线原理的全景影像真彩色点云生成算法[J]. *测绘工程*, 2015(4): 1-5, 10.
- [27] Yue M Y, Kang Z Z. Registration of Point clouds with panoramic images based on gnomonic projection and line features [J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(1): 10-16.
岳明宇, 康志忠. 利用球心投影与线特征的点云与全景影像配准[J]. *遥感信息*, 2017, 32(1): 10-16.