

移动测量的视频影像与激光点云配准方法

查陆九^{1,3}, 夏永华^{2,3*}, 汪斌^{2**}, 杨明龙^{2,3}, 潘乙榕^{1,3}, 陈若^{1,3}, 朱琪^{1,3}

¹昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

²昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650051;

³昆明理工大学云南高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093

摘要 移动测量系统可同时采集三维激光点云、影像纹理及位置姿态数据,但使用影像照片与激光点云配准融合难以满足高效率和高重叠度的需求。针对这一问题,提出一种在移动测量下使用视频影像与激光点云配准的方法。利用定位定姿系统(POS)传感器提供的位置姿态数据,结合共线方程模型得到视频影像关键帧与激光点云初始配准值;利用基于Robust估计的选权迭代法提高初始配准值精度,确定配准参数的精确值;自视频影像生成立体密集匹配点云,并与三维激光点云进行最邻近迭代配准。实验结果表明,视频影像与车载激光点云的配准方法是可行的,配准精度高,能满足城市街道三维重建、部件采集、目标提取等量测应用需求。

关键词 视频影像; 激光点云; 配准; 关键帧; 移动测量系统

中图分类号 P232

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1013001

Registration Method of Video Image and Laser Point Cloud Under Moving Measurement

Zha Lujiu^{1,3}, Xia Yonghua^{2,3*}, Wang Bin^{2**}, Yang Minglong^{2,3}, Pan Yirong^{1,3},
Chen Ruo^{1,3}, Zhu Qi^{1,3}

¹Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, Yunnan, China;

²City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan, China;

³Surveying & Mapping Technology and Application Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract Motion measurement system can simultaneously collect three-dimensional (3D) laser point clouds, image texture, and the position and attitude data; however the registration fusion of image photos and laser point cloud is challenging to meet the needs of high efficiency and high overlap. This paper proposes a method to register video images with laser point clouds under motion measurement to solve this problem. The positioning orientation system (POS) sensor's position and attitude data are used to calculate the initial registration value of keyframes in a video image and a laser point cloud using a collinear equation model. The iterative method for selecting weights based on Robust estimation improves the accuracy of initial registration values and determines the exact values of registration parameters. The stereo-dense matching point cloud is generated from the keyframe of the video image, and the nearest neighbor iterative registration is performed using the 3D laser point cloud. The experimental results show that the registration method of video image and a vehicular laser point cloud is feasible, and the registration accuracy is high, meeting the requirements of 3D reconstruction of urban streets, component acquisition, target extraction, and other measurement applications.

Key words video image; laser point cloud; registration; key frame; mobile mapping system

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-09-08; 录用日期: 2021-09-16

通信作者: *617073761@qq.com; **49031524@qq.com

1 引言

近年来,车载移动测量系统(MMS)商用技术平台发展及其研究内容广泛,系统地搭载了三维激光雷达(LiDAR)、摄像机和定位定姿系统(POS)传感器等设备。车载MMS可全天候高效采集街道路面、交通标识、树木资产等地基数据^[1-2],可提供高分辨率的三维激光雷达点云、全景视频影像和地理位置姿态信息等数据,并广泛运用到高速公路维护测量、城市街道三维场景构建^[3]、地形图测绘等领域。车载MMS获取的多源数据需进行坐标转换、点云配准和融合,这是车载MMS研究的一个热点方向 and 未来发展趋势^[4]。

联合利用激光点云和视频影像数据的一个关键步骤是对两者进行高精度配准,且是车载MMS数据融合的关键^[5]。针对影像和三维激光点云配准方法,目前有基于POS传感器直接输出方位元素值来整体补偿传感器平台标定参数,进而进行车载激光点云和影像的配准^[6]。该类方法需使用硬件同步与几何检校的方法进行数据配准,但由于硬件同步与几何标定的局限性、Global Navigation Satellite System(GNSS)信号质量与惯性测量单元(IMU)漂移误差的存在^[7-8],该类方法亦不能很好解决视频影像与激光点云的配准问题。基于几何配准基元匹配的2D(全景影像)-3D(激光点云)自动方法,该类方法需从影像与激光点云中提取出共轭配准基元匹配点对,利用已有的建构物线框模型作为先验知识^[9-10],但如何找到实际场景中的线框轮廓与激光点云轮廓的相似性并进行稳健的共轭配准基元提取与配准是尚未完全解决的问题。基于点特征^[11]、线特征^[12]、面特征^[13]的配准方法,此类方法将激光点云生成强度或者深度图像,通过传统的图像配准方法,根据点云数据生成的强度与深度影像实现与影像的2D配准^[7],此类方法对单张影像与激光点云的配准效果较佳,但对视频影像与激光点云的匹配则难以满足重叠度与拼接要求。

上述三种配准研究方法在视频影像和激光点云配准中存在一定缺点。为此,本文研究一种移动测量下的视频影像与激光点云配准方法。首先使用POS传感器提供的GPS时间戳,精确提取视频影像中的关键帧与激光点云对应的共线方程初始值;然后基于共线方程模型进行初始配准,进而使

用Robust估计值法对配准参数初始值进行优化;最后使用视频影像生成体密集匹配点云与激光点云,进行3D-3D精确配准,消除初始配准中边缘区域的配准误差,提高配准精度。

2 研究方法

所提视频影像与三维激光点云配准方法的流程如图1所示,所提方法主要分为数据预处理、初始配准、精配准3个步骤。首先,对数码相机进行镜头畸变校正,获取数码相机内外参数,并对提取的视频影像关键帧进行畸变矫正;然后,对三维激光点云进行去噪、精简等处理;其次,使用POS传感器中的位置、姿态与时间信息数据^[14],根据时间同步原理,获取数码相机拍摄视频影像与三维激光雷达扫描点云在同一时刻下的时间戳,在同一时间戳的基础上,从POS数据中提取出视频影像与激光点云对应的配准初始值,并基于共线方程模型进行初始配准;最后,利用基于Robust估计的选权迭代法提高配准初始值精度,确定高精度的配准值,消除选点误差、仪器误差等影响。结合成熟的迭代最近点(ICP)算法,把高精度的配准值作为ICP算法的初始值,从而间接使用视频影像点云与激光点云进行迭代最近点配准,获得高精度的3D-3D配准。

2.1 数据预处理

数据预处理过程分为视频影像预处理和激光点云预处理。在车载MMS集成系统中,采集影像数据的影像传感器主要有CCD面阵相机、高分辨率全景相机与非量测相机等。本文使用普通数码相机采集近景视频影像数据,但普通数码相机的构象质量普遍较差,畸变误差高达几十个像元,影响到了摄影构象的共线条件,导致计算结果不准确甚至迭代不收敛。因此,在进行视频影像与点云配准前需要对数码相机进行严格的检校。数码相机中的透镜畸变主要有来自透镜形状的径向畸变和整个摄像机组装过程造成的切向畸变,透镜畸变会使图像点沿切向运动,离中心点越远,变形量越大^[15]。切向畸变可以用两个额外的参数 p_1 和 p_2 来描述,公式为

$$\begin{cases} x_{\text{corr}} = x + [2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{\text{corr}} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2x] \end{cases} \quad (1)$$

对于普通数码摄像机,径向畸变比较小,因此可用 $r=0$ 位置周围的泰勒级数展开的前几项来定

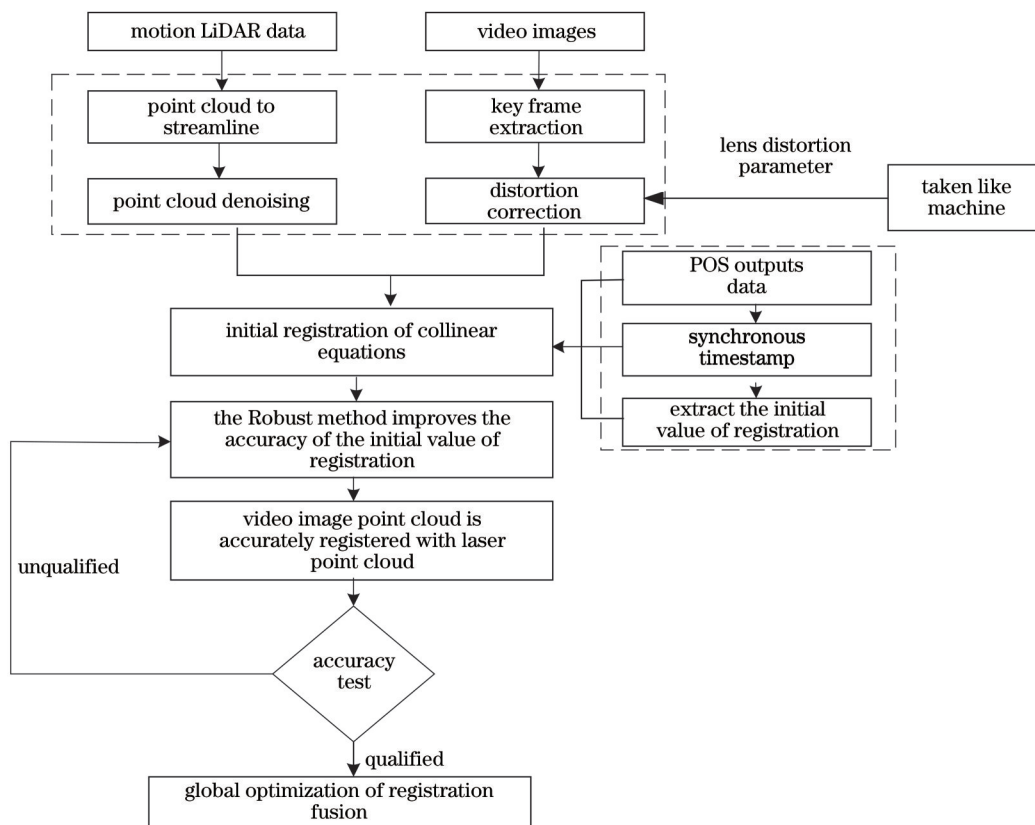


图 1 研究技术路线图

Fig. 1 Research technology road map

量描述,通常使用前两项系数,第一项为 k_1 ,第二项为 k_2 ,描述径向畸变的公式为

$$\begin{cases} x_{\text{corr}} = x + (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{\text{corr}} = y + (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)^\circ \end{cases} \quad (2)$$

普通数码相机透镜畸变的检校方法经常采用张正友提出的一种介于传统标定和自标定方法之间的相机标定方法^[16],该方法通过至少 4 个不同位置获取标定物的图像,计算数码相机所有的内外参数,具有准确、实用、简便与快速的特点。因此,采取张正友提出的摄影机标定法对数码相机进行镜

头畸变校正,具体检校步骤如下:在棋盘格图像和数码相机之间固定一方于静止状态,从不同方向获取 17 张影像;把棋盘格影像的右上角定为图像坐标原点,并根据影像的长和宽获取棋盘格上的方格数目;在上述两个步骤的基础上进行角点检测;进行参数的初始化和非线性最优化,计算数码相机的内参数和畸变系数。张正友相机标定法的流程如图 2 所示。得到数码相机镜头校正畸变参数后,即可通过计算畸变映射完成对影像的矫正,数码相机镜头校正参数如表 1 所示。

表 1 相机检校参数表

Table 1 Camera calibration parameter table

unit: pixel

Focal length		Center coordinate		Radial distortion		Tangential distortion	
f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2	p_1	p_2
192.64	192.53	200.74	150.43	-0.8241	-0.7659	0.00247	0.00368

由于激光扫描数据量大且扫描视场广,为了加快数据处理速度,需对点云数据进行预处理,主要有点云数据的滤波、去噪和抽稀等。具体操作流程为:首先,使用点云后处理软件 Maptek,通过人机交互操作,删除原始点云数据中存在的粗差、

错误点和无关信息;其次,对目标区域的点云数据进行滤波处理,去除测量噪声点,避免噪声点降低配准的精度;最后,使用曲率采样法进行点云抽稀,简化点云数据的同时能有效保留有用的特征信息。

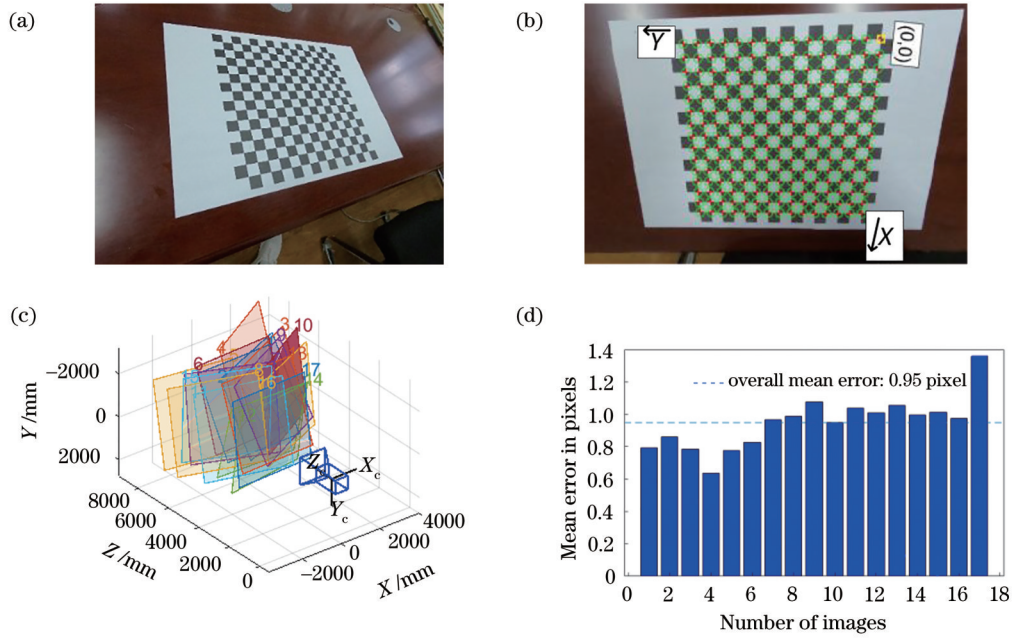


图2 Matlab2020程序算法实现的张正友相机标定法过程。(a)沿不同方向获取的棋盘格图像;(b)图像坐标原点的确定及角点检测;(c)17张棋盘格影像在图像坐标系中的位置;(d)17张棋盘格影像的参数检验精度

Fig. 2 Process diagram of Zhang Zhengyou camera calibration method realized by Matlab2020 program algorithm. (a) Checkerboard images obtained from different directions; (b) origin determination and corner detection of image coordinates; (c) positions of 17 checkerboard images in the image coordinate system; (d) parameter test accuracy of 17 checkerboard images

2.2 共线方程的初始配准模型

车载MMS在采集数据过程中可持续不断地拍摄视频影像数据,通过设置数码相机的采样帧率,最少1s可获得25帧图像。以提取出的其中一帧图像为例来阐述与激光点云间的初始配准。对于某一个采集目标点,其所对应激光点的三维激光雷达坐标与同名图像点的像空间辅助坐标间的关系为

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{IH} \left(\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} - \mathbf{C}_{IH} \right), \quad (3)$$

式中: $[X_I \ Y_I \ Z_I]^T$ 为图像点的像空间辅助坐标; $[X_H \ Y_H \ Z_H]^T$ 为激光点在三维激光雷达坐标系下的坐标; \mathbf{R}_{IH} 和 \mathbf{C}_{IH} 分别表示像空间辅助坐标系和三维激光雷达坐标系间的旋转矩阵和平移变量。

视频影像与激光点云配准是一种使得视频影像关键帧图像能与物方坐标系下的同名场景中的激光点云进行“套合”的过程,因此,需要恢复视频影像中提取的关键帧图像在物方坐标系下的位置与姿态。车载MMS中的POS传感器数据可构建视频影像中每个像素构成的摄影光束与物方点云的

初始对应关系,则惯导坐标系K、三维激光雷达坐标系H和WGS-84坐标系W间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{KH} \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{KH}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{WK} \begin{bmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{WK}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{R}_{KH} 和 \mathbf{T}_{KH} 分别表示惯导坐标系与三维激光雷达坐标系间的旋转矩阵和平移量; \mathbf{R}_{WK} 和 \mathbf{T}_{WK} 分别表示WGS-84坐标系和惯导坐标系间的旋转矩阵和平移量。

综合式(3)~(5),即可得到视频影像关键帧的图像点像空间辅助坐标与其WGS-84坐标系间的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{IW} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} - \mathbf{C}_{IW}, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_{IW} = \mathbf{R}_{IH} \mathbf{R}_{HW}^{-1} = \mathbf{R}_{IH} \mathbf{R}_{HK}^{-1} \mathbf{R}_{KW}^{-1}, \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{IW} = \mathbf{T}_{KW} + \mathbf{R}_{KW} \mathbf{T}_{HK} + \mathbf{R}_{KW} \mathbf{R}_{HK} \mathbf{C}_{IH}. \quad (8)$$

通过上述坐标系间的相互转换,明确了各个传

感器间的相对空间位置信息,结合 POS 提供的位置与姿态信息数据,最后基于共线方程即可实现视频

影像关键帧与激光点云的初始配准^[17]。共线方程为

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_c) + b_1(Y - Y_c) + c_1(Z - Z_c)}{a_3(X - X_c) + b_3(Y - Y_c) + c_3(Z - Z_c)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_c) + b_2(Y - Y_c) + c_2(Z - Z_c)}{a_3(X - X_c) + b_3(Y - Y_c) + c_3(Z - Z_c)} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: x, y 为像点的像平面坐标; x_0, y_0, f 为影像的内方位元素; X_c, Y_c, Z_c 为摄像机中心的物方空间坐标; X, Y, Z 为激光点的物方空间坐标; $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为影像的 3 个外方位元素。

车载 MMS 在采集数据过程中为了兼顾各个传感器间的工作频率,获取高效率的不同传感器数据,多数处于匀速前进状态。通过设置数码相机的拍摄帧率,结合实际场景复杂程度,可从视频影像中提取出重叠度高达 90% 以上的关键帧图像。使用共线方程模型进行视频影像与激光点云的初始配准,其步骤为:利用 POS 传感器输出的时间戳信息数据,获取时间对齐下的视频影像关键帧与激光点云;根据张正友相机标定法获取相机镜头畸变校正参数,进行图像矫正;结合 POS 传感器的位置及姿态信息获取视频影像关键帧的内外方位元素,进行共线方程模型的解算。

2.3 基于 Robust 估计的选权迭代法 3D-3D 精配准

由于车载 MMS 安装误差、缩放系数误差与仪器误差的存在,使用 POS 传感器的位置姿态数据进行共线方程解算的结果只能作为粗配准值。因此选取 Robust 估计值法^[18],通过选权迭代,对精度低的粗配准点进行剔除或降权处理,即可获取高精度的配准参数初始值。随着选权迭代的不断进行,含有粗差观测值的权将越来越小,直至趋近于零,迭代终止时,获得相应残差,而平差结果不再受到粗差的干扰。选权迭代的条件可表示为

$$\sum p_i u_i^2 \rightarrow V_{\min}, \quad (10)$$

其中,权公式为

$$p_{t+1} = p_t f(u), \quad t = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

式中: t 代表迭代次数; u 为改正数; $f(\cdot)$ 是权函数。

为提升整个平差模型的抗差性,选权迭代的权函数至关重要,使用王任享^[19]提出的标准化残差替换残差作为权函数的参数。标准化残差的公式可表示为

$$\bar{u}_j = \frac{|u_j|}{Sm_0}, \quad (12)$$

式中: $S = \sqrt{\sum_{k=1}^m g_{jk}^2}$; \bar{u}_j 为标准化残差; u_j 为观测值残差; m 为观测值个数; m_0 为观测值标准偏差; g_{jk}^2 为 $Q_{uu}P$ 中的主对角外元素。

解算 $Q_{uu}P$ 的公式为

$$Q_{uu}P = E - AQ_{xx}A^T P, \quad (13)$$

式中: E 为观测误差矢量; A 为观测方程系数阵。使用式(12)标准化因子对丹麦法权函数进行改进,可得到优化后的丹麦法权函数式(13),从而得到精确的选权迭代权函数式:

$$f(u) = \exp \left[-0.05 \left(\frac{|u| \sqrt{p_0}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m g_{jk}^2 m_0}} \right)^{4.4} \right], \quad (14)$$

$$f(u) = \exp \left[-0.05 \left(\frac{|u| \sqrt{p_0}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m g_{jk}^2 m_0}} \right)^{3.0} \right], \quad (15)$$

式中: p_0 为权因子。

通过上述流程可得到优化后的丹麦法权函数,为了简化程序算法,在共线方程初始配准模型的基础上改进丹麦法选权迭代,则共线方程的误差方程可表示为

$$\begin{cases} v = AX - LP \\ X = (A^T PA)^{-1} A^T PL^o \end{cases} \quad (16)$$

利用 Robust 估计值法提高粗配准参数的具体步骤如下:1)根据式(16)平差以最小二乘迭代开始,第一次迭代应用 POS 位置姿态数据值的权阵为单位矩阵;2)应用第一次迭代的残差,根据式(14)与式(15)计算第二次迭代的权函数,进行改进的丹麦法选权迭代;3)计算单位权中误差,如果不满足条件,循环至步骤 2),直至精度满足要求;4)按照式(16)的要求,以第三次迭代为分界点,迭代终止的条件为视频影像关键帧图像角元素改正数经两次

运算的差值为 0.1'。

Robust 估计值法可提高视频影像与激光点云配准参数初始值精度,优化后的配准参数初始值作为视频影像与激光点云的高精度定向参数。车载 MMS 数据采集过程中的数据量极大,要使视频影像与激光点云进行高精度的配准,利用视频影像生成立体密集匹配点云,将 Robust 估计值法提供的高精度配准参数作为 ICP 算法的初始值,避免了 ICP 算法对初始配准值精度差导致配准效果不理想的缺点,继而间接结合成熟的 ICP 算法进行视频影像点云与激光点云之间的 3D-3D 精确配准。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据

采用大疆公司 Livox-40 三维激光扫描仪获取三维点云数据、Gopro black 8 摄影机拍摄二维影像数据、维特智能公司的 WTGAHRS2 型 POS 设备获取位置姿态数据,针对上述三个不同功能的传感器,本实验将各个传感器安置在手推车上,便于高效地进行数据采集,设备集成如图 3 所示。三维激光扫描仪、摄影机与 POS 设备的主要参数如表 2 所示。

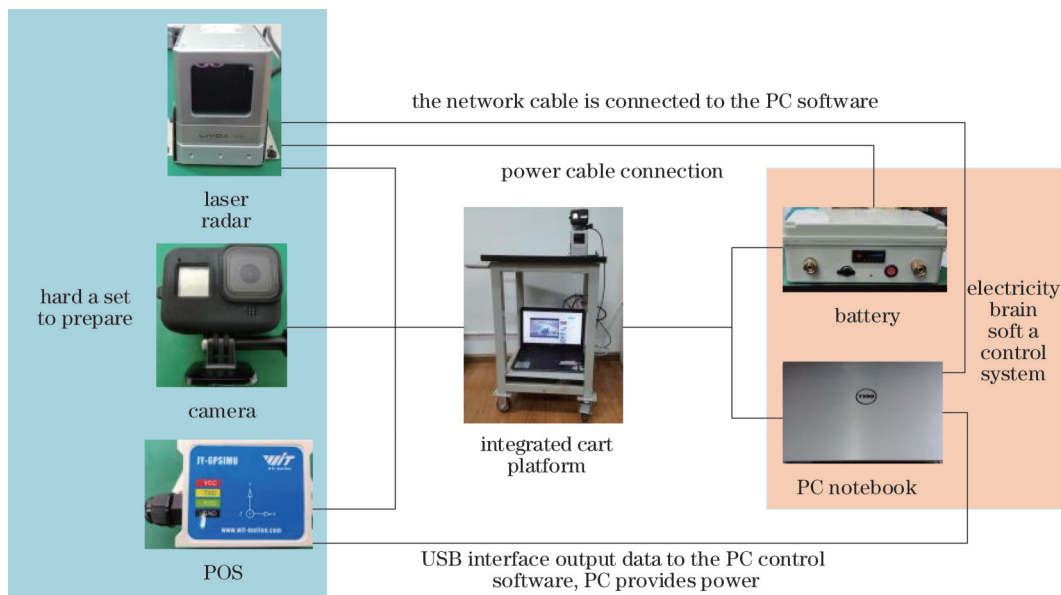


图 3 设备集成安装工作模式示意图

Fig. 3 Schematic of working mode of equipment integration installation

表 2 实验仪器的相关参数

Table 2 Relevant parameters of experimental instruments

Livox Mid-40				Gopro black 8			Wit WTGAHRS2		
Laser wavelength	FOV	Maximum range	Divergent angle	Sensor size	Pixel	Maximum resolution	Positioning accuracy	Precision of angle	Attitude measurement stability
905 mm	38.4°	260 m@80% reflectivity	0.28°(vertical) × 0.03°(level)	9.982 mm × 9.982 mm	8 million	3280 × 2160	±0.5 m	static 0.05° dynamic 0.1°	0.01°

为验证所提配准方法的正确性和可靠性,使用自主集成的移动测量车对云南省昆明市新兴路某一路段街道立面进行视频影像与激光点云数据采集。数据采集时人工推着集成设备在人行道上行走 105 m 的距离,用时 2 min,数据采集完毕后,三维激光扫描仪共获得 5398164 个点。从 Gopro black 8 摄影机保存后的视频影像实时源文件中提取出 352 张关键帧影像,设置 WTGAHRS2 型 POS 传感

器数据回传速率为 100 Hz,每秒钟获得 100 个位置姿态数据,共获取 21163 个位置姿态数据。

3.2 实验结果分析

使用 MatlabR2020b 作为编程平台,实现相机镜头畸变校正,同时使用 DirectShow 软件进行视频影像关键帧提取,并根据镜头畸变校正参数矫正影像中出现的切向畸变和径向畸变。在时间对齐的基础上,从保存后的 POS 数据中提取 352 个位置姿态

数据,得到初配准值,作为视频影像与激光点云的共线方程初始配准值。为减少初始配准工作量,先对大量激光点云进行去噪、滤波及删除等预处理,基于

共线方程模型进行视频影像与激光点云的初始配准,并将激光点云数据反投影至视频影像上,初始配准效果如图 4 所示。

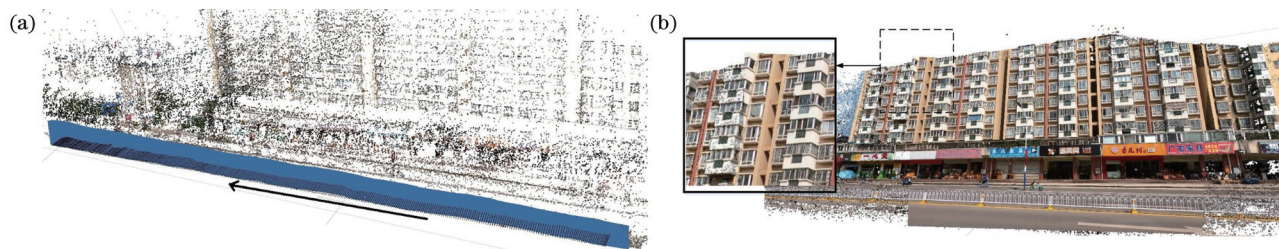


图 4 初始参数配准效果。(a) 关键帧位置及拍摄方向示意;(b) 点云数据反投影至视频影像关键帧

Fig. 4 Initial parameter registration effect. (a) Key frame position and shooting direction; (b) point cloud data backprojecting to key frames of video images

从图 4 可以看到,仅仅使用 POS 传感器的位置姿态数据作为共线方程配准模型的初始参数时,激光点云在视频影像中的坐标与实景的坐标存在明显的偏差。从视频影像中提取出高重叠度的关键帧,352 帧图像都有其对应的初始配准参数,由于最终使用视频影像生成点云,间接实现与激光点云的配准,而由 Robust 估计法得到的高精度配准初始值已在程序中得到计算,精度检验在后文中展开说明。按照 2.3 节内容所述,使用 Robust 估计的选权

迭代法对初始配准值进行降权,提高初始配准值精度,确定高精度的初始配准值。获取精确的初始配准参数值后,将配准参数作为 ICP 算法配准的初始值,避免 POS 数据质量低、几何配准基元提取与匹配错误导致的 ICP 算法迭代错误收敛的难题。基于视频影像生成的立体密集匹配影像点云,使用 ICP 算法进行视频影像点云与激光点云的全局优化配准,全局优化精配准效果如图 5 所示。



图 5 基于 Robust 估计的选权迭代法的精确配准效果。(a) 未利用 Robust 法提高配准参数精度的配准效果;(b) 利用 Robust 法提高配准参数精度的配准效果;(c) 视频影像点云与激光点云配准融合效果

Fig. 5 Accurate registration effect of the iterative method of weight selection based on Robust estimation. (a) Registration effect without using Robust method to improve the accuracy of registration parameters; (b) registration effect using Robust method to improve the accuracy of registration parameters; (c) video image point cloud and laser point cloud registration fusion effect

从图 5(a) 的配准结果可以看到,在不使用 Robust 估计的选权迭代法提高初始配准参数值精度的情况下,直接利用 ICP 算法进行视频影像点云与激光点云配准时两者间的配准迭代效果差,点云

坐标存在明显偏差。从图 5(b) 的配准效果来看,在使用基于 Robust 估计的选权迭代法提高配准参数值后,视频影像点云与激光点云达到较好的配准效果,两者的坐标对应关系强。城市街道的路灯、垃

圾桶、店铺名称等地物具有明显的特征,如图 5(c)所示,视频影像点和激光投影点实现了精确的“套合”,即二者具有较高的异源数据配准精度。

3.3 配准精度分析

通过配准后的视频影像的像点反算其对应激光点云的物方坐标,并与实测的检查点物方坐标进行精度对比分析,从而定量分析视频影像与激光点云的配准精度。选取了 20 个检查点进行实验分析,其中 X 、 Y 、 Z 是全站仪获取的检查点在 WGS-84 坐标

系下的坐标; X' 、 Y' 、 Z' 是视频影像的像点所对应的同名激光点云的物方坐标。由表 3 可以得出,通过 20 个检查点的视频影像图像点坐标反算激光点云物方坐标,并与实测坐标进行对比,视频影像与三维激光点云全局精确配准的平面与高程误差可达 0.08 m。因此,所提方法进行视频影像与激光点云的配准,并融合视频影像点云与三维激光点云两种异源数据,可以满足城市大、中比例尺的测图精度与城市街道部件检测、信息提取、三维重建的需求。

表 3 配准结果精度检验

Table 3 Accuracy test of registration results

unit: m

No.	Measured coordinate of checkpoint WGS-84			Point cloud coordinate of the same name WGS-84			Error precision		
	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	D_x	D_y	D_z
1	494.494	728.807	1894.605	494.554	728.765	1894.685	-0.060	0.042	-0.080
2	488.137	721.866	1894.086	488.202	721.803	1894.196	-0.065	0.063	-0.110
3	485.618	713.826	1893.883	485.705	713.898	1893.731	-0.087	-0.070	0.152
4	473.868	708.470	1893.993	473.789	708.230	1893.893	0.079	0.240	0.100
5	465.337	703.915	1894.678	465.382	703.809	1894.792	-0.045	0.106	-0.110
6	461.747	696.929	1894.049	461.653	696.993	1894.160	0.094	-0.060	-0.110
7	462.803	691.432	1893.828	462.693	691.452	1893.930	0.110	-0.020	-0.100
8	444.450	684.752	1894.358	444.530	684.698	1894.307	-0.080	0.0540	0.051
9	436.825	666.034	1893.775	436.895	666.120	1893.760	-0.070	-0.090	0.015
10	434.358	675.892	1894.367	434.308	675.957	1894.362	0.050	-0.070	0.005
11	448.600	653.784	1893.541	448.703	653.897	1893.581	-0.103	-0.110	-0.040
12	453.006	658.409	1893.688	453.103	658.401	1893.619	-0.097	0.008	0.069
13	473.495	678.592	1893.808	473.488	678.480	1893.879	0.007	0.112	-0.070
14	488.872	687.987	1893.838	488.802	687.857	1893.868	0.070	0.130	-0.030
15	497.476	702.005	1893.879	497.550	702.087	1893.801	-0.074	-0.080	0.078
16	500.709	734.423	1893.927	500.761	734.479	1893.834	-0.052	-0.060	0.093
17	507.491	741.379	1894.586	507.481	741.291	1894.690	0.010	0.088	-0.100
18	511.308	738.946	1893.955	511.35	738.987	1893.857	-0.042	-0.040	0.098
19	509.759	743.305	1894.544	509.783	743.391	1894.509	-0.024	-0.090	0.035
20	510.953	744.445	1893.952	510.883	744.482	1893.907	0.070	-0.040	0.045

为定性分析所提视频影像与激光点云配准方法的普适性,拍摄昆明理工大学新迎校区国旗杆基

座进行三维模型重建,模型结果如图 6 所示。测量出实际国旗杆基座的底部长度、台阶高、台阶长、旗

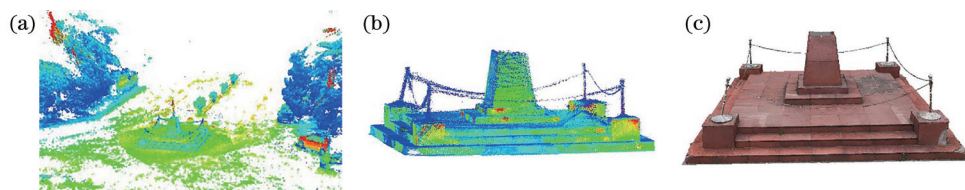


图 6 所提方法进行点云三维模型重建的示意图。(a)国旗杆基座激光点云;(b)配准后的国旗杆点云;(c)视频影像与激光点云重建三维模型

Fig. 6 Schematic of point cloud 3D model reconstruction using the proposed method. (a) Laser point cloud of the base of the national flagpole; (b) point cloud of the national flagpole after registration; (c) reconstruction of 3D models of video images and laser point clouds

杆正下斜柱体高、四角点正方体高与宽精确值,具体数值如表 4 所示,并从三维模型中测量出相同位置的长、高值进行精度比较分析,最大绝对误差为 0.007 m,最小绝对误差为 0.002 m,平均绝对误差为 0.0042 m,中误差为 0.0046 m。由于 0.007 m 小

于两倍中误差 0.0092 m,所以 0.007 m 属于偶然误差,根据有关文献,地物点相对邻近地物点的间距误差应小于等于 8 cm,所以所提方法远远满足一般建筑的测量要求。

表 4 实测值与三维模型测量值的对比

Table 4 Comparison between the measured values and those of the 3D model

No.	Type	Actual size /m	Model size /m	Size deviation /m
1	Base length	5.387	5.394	-0.007
2	Step of high	0.155	0.153	0.002
3	Square table body width	0.624	0.622	0.002
4	Square table height	0.483	0.479	0.004
5	Square table body spacing	3.584	3.589	-0.005
6	Next step of the flagpole	1.796	1.792	0.004
7	Two steps below the flagpole	1.222	1.229	-0.007
8	Step descend from the flagpole	0.155	0.150	0.005
9	Slanted column below the flagpole	1.219	1.217	0.002

4 结 论

对视频影像与三维激光点云的配准方法进行了研究,利用 POS 数据获取了视频影像关键帧与激光点云基于共线方程配准模型的初始配准参数,根据基于 Robust 估计的选权迭代提高了初始配准值精度,从而实现了视频影像点云与激光点云高精度的迭代最近点配准。通过实测数据验证,所提配准方法简单有效、可操作性强、精度高,能满足城市测量中部件检测、信息提取、三维模型重建需求。由于传感器视场角的局限性,采集不到城市街道高楼层及顶部数据,不能全面得到城市街道信息。在未来,将研究使用无人机等多种数据采集方式进行数据采集,进而与车载移动测量数据进行数据融合补充。

参 考 文 献

- [1] 陈驰, 杨必胜, 田茂, 等. 车载 MMS 激光点云与序列全景影像自动配准方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 215-224.
Chen C, Yang B S, Tian M, et al. Automatic registration of vehicle-borne mobile mapping laser point cloud and sequent panoramas[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 215-224.
- [2] 侯艳芳, 叶泽田, 杨勇. 基于 POS 数据的车载面阵 CCD 影像与激光点云融合处理研究[J]. 遥感信息, 2011, 26(4): 76-79.

Hou Y F, Ye Z T, Yang Y. Research on integrated processing of vehicle-borne array CCD images and laser point cloud based on POS data[J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(4): 76-79.

- [3] 朱颖, 赵明. 基于语义分割的城区激光点云与光学影像配准[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0110002.
Zhu Y, Zhao M. Registration of laser point cloud and optical image in urban area based on semantic segmentation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0110002.
- [4] Peng C W, Hsu C C, Wang W Y. Cost effective mobile mapping system for color point cloud reconstruction[J]. Sensors, 2020, 20(22): 105-112.
- [5] 邵杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.
Shao J, Zhang A W, Wang S M, et al. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
- [6] 吴胜浩, 钟若飞. 基于移动平台的激光点云与数字影像融合方法[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 57-61.
Wu S H, Zhong R F. The 3D visualization's approach based on vehicle-borne laser scanning[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2011, 32(4): 57-61.
- [7] Wang R S, Ferrie F P, MacFarlane J. Automatic registration of mobile LiDAR and spherical panoramas [C]//2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops,

- June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 33-40.
- [8] Chen C, Yang B, Deng C. Registration of the panoramic image sequence onto mobile laser scanning point cloud using linear features[EB/OL]. [2021-08-11]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=a28fdd8d9f59eacba240f98249aa318&site=xueshu_se&hitarticle=1.
- [9] Taneja A, Ballan L, Pollefeys M. Geometric change detection in urban environments using images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(11): 2193-2206.
- [10] Hofmann S, Eggert D, Brenner C. Skyline matching based camera orientation from images and mobile mapping point clouds[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, II-5: 181-188.
- [11] Parmehr E G, Fraser C S, Zhang C S, et al. Automatic registration of optical imagery with 3D LiDAR data using statistical similarity[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 88: 28-40.
- [12] González-Aguilera D, Rodríguez-González P, Gómez-Lahoz J. An automatic procedure for co-registration of terrestrial laser scanners and digital cameras[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(3): 308-316.
- [13] 马洪超, 姚春静, 邬建伟. 利用线特征进行高分辨率影像与 LiDAR 点云的配准[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(2): 136-140, 159.
Ma H C, Yao C J, Wu J W. Registration of LiDAR point clouds and high resolution images based on linear features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 136-140, 159.
- [14] Swart A, Broere J, Veltkamp R, et al. Refined non-rigid registration of a panoramic image sequence to a LiDAR point cloud[M]//Stilla U, Rottensteiner F, Mayer H, et al. *Photogrammetric image analysis. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2011, 6952: 73-84.
- [15] 刘善磊, 赵银娣, 王光辉, 等. 一种关键帧的自动提取方法[J]. *测绘科学*, 2012, 37(5): 110-112, 115.
Liu S L, Zhao Y D, Wang G H, et al. A method for automatic extraction of key frames[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012, 37(5): 110-112, 115.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] 王佩军, 徐亚明. *摄影测量学*[M]. 3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2016: 47-50.
Wang P J, Xu Y M. *Geo-spatial information science* [M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2016: 47-50.
- [18] 胡春梅, 王晏民. *地面激光雷达与近景摄影测量技术集成*[M]. 北京: 测绘出版社, 2017: 56-60.
Hu C M, Wang Y M. *Technical integration of terrestrial LiDAR and close-range photogrammetry* [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2017: 56-60.
- [19] 王任享. 选权迭代定位误差时权函数参数之功能[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1988, 13(4): 42-50.
Wang R X. Function of weight function parameters in selective iterative positioning error[J]. *Journal of Wuhan University of Surveying and Mapping Science and Technology*, 1988, 13(4): 42-50.