

文章编号:1001-5078(2024)07-1045-08

· 激光应用技术 ·

基于激光雷达扫描的观览车摆角测量方法

余鹏程^{1,2}, 熊芝^{1,2}, 董佳乐^{1,2}, 黄荔生^{3,4}, 胡诚³

- (1. 湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北 武汉 430068;
3. 江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院, 江西 南昌 330029;
4. 江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院鹰潭检测分院, 江西 鹰潭 335000)

摘要:针对现有的倾角仪在测量大型观览车最大摆角时存在的安装复杂、测量效率低下问题,本文提出了一种结合特征滤波与投影转换的摆角测量方法。该方法综合使用激光雷达与监控相机的数据,实现对大型观览车摆角的非接触式精确测量。首先,通过方向特征滤波器选取摆臂部分的点云;接着,利用形状特征滤波器移除不规则形状的点云;然后,将这些点云投影至二维平面,并用最小二乘法拟合边缘直线来解算摆角。最后,通过等比例模型实验得到该方法角度测量平均误差绝对值为 0.29° ,最大误差绝对值为 0.45° 。实验结果表明,该方法能有效提升大型观览车摆角的测量效率并确保测量精度。

关键词:激光点云;观览车;特征滤波;投影变换;摆角测量

中图分类号:TN958.98;TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.006

Swing-angle measuring for observation vehicle based on LiDAR scanning

YU Peng-cheng^{1,2}, XIONG Zhi^{1,2}, DONG Jia-le^{1,2}, HUANG Li-sheng^{3,4}, HU Cheng³

- (1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068, China;
3. Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Jiangxi Provincial General Institute of Inspection and Certification, Nanchang 330029, China;
4. Special Equipment Inspection and Testing Research Institute Yingtan Detection Branch, Jiangxi Provincial General Institute of Inspection and Certification, Yingtan 335000, China)

Abstract: Aiming at the problems of complicated installation and low measurement efficiency of existing inclinometers in measuring the maximum pendulum angle of large observation cars, a swing angle measurement method that combines feature filtering and projection conversion is proposed in this paper. This method uses a combination of LiDAR and surveillance camera data to achieve non-contact, accurate measurement of the swing angle of a large observation vehicle. Firstly, the point cloud of the swing arm is selected by a directional feature filter. Then, the irregularly shaped point cloud is removed by a shape feature filter. Next, the point cloud is projected to a two-dimensional plane and the edge straight line is fitted by the least-squares method to solve the swing angle. Finally, the average absolute value of the angle measurement error of the method is 0.29° , and the maximum absolute value of the error is 0.45° , which is obtained by the equal scale model experiment. The experimental results show that the method can effectively improve the efficiency and ensure the accuracy of the measurement of the pendulum angle of the large observation car.

Keywords: laser point cloud; observation car; feature filtering; projection transformation; pendulum angle measurement

基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(No. 2021MK057);江西省市场监督管理局科技项目(No. GSJK202107)资助。

作者简介:余鹏程(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光与光电检测。E-mail: 102110168@hbut.edu.cn

通讯作者:熊芝(1985-),女,博士,副教授,主要研究方向为工业大尺寸测量和光电检测技术。E-mail: xiongzhi0611@163.com

收稿日期:2023-10-25; **修订日期:**2023-11-19

1 引言

随着社会生活水平的提高,大型观览车如大摆锤、海盗船等的数量迅速增加。然而,这些设施的设计、制造质量以及后期维护存在着一定的滞后和管理挑战,导致了重大故障和事故的频发,给社会带来了严重的不良影响^[1]。对于此类大型观览车中,最大摆角被认为是评估安全性的核心参数之一,因此对其进行准确测量至关重要。目前,传统的游乐设施摆角测量方法通常依赖于倾角仪或其他传感器等接触式测量方法^[2],这种方法安装要求高、造成现场检验检测工作复杂、检测效率低。

为解决上述问题,视觉测量技术是常用的非接触式测量方法之一^[3]。视觉测量技术可分为单目、双目和多目视觉测量技术^[4-5]。单目视觉技术无法获取目标的深度信息^[6],对于大尺寸目标的测量存在一定困难。大型观览车工作环境为室外,旋转臂长至十多米及以上,且周围障碍物多易受干扰^[7],采用双目或多目测量技术^[8]难以满足其通视要求,测量范围有限。为此,传感器融合技术^[9]成为了研究的重要方向。激光雷达具有广泛的测量范围和高精度的特点,能够获取复杂环境的三维信息并提供精确的空间位置测量^[10-12]。通过将视觉和激光雷达技术相结合,综合利用它们的优势,增强现场感知能力^[13],可满足在复杂环境下测量要求。

激光雷达和视觉组合测量技术在其他领域也有较为广泛的应用,谷潇^[14]使用航空摄影测量技术与无人机机载雷达技术测量长输管道,通过分析雷达飞行、地面控制测量、激光点云数据处理及数字高程模型生成、影像数据处理等,完成长输管道测量。于丙辰^[15]利用基于图片生成空间点云的三维重建技术,设计了一种用于获取大型不可移动文物的表面精细几何纹理的三维重建技术流程。李法斌^[16]通过采集电力杆塔可见光影像数据与激光雷达点云数据,构建电力杆塔三维模型,完成杆塔倾斜测量任务。王盛杰^[17]提出多维数据融合求解目标位姿的方法,对距离激光雷达 1 km 外的目标进行测量,其位移精度小于 3 cm,位姿角误差小于 3°。以上方法在不同领域内使用了激光雷达和视觉组合测量技术,但大多数的测量均是针对三维重建需求或静态被测物,由于观览车尺寸大、运动速度较快且现场测量环境复杂,本文将着重研究动态环境下的点云数

据处理技术及几何量数学测量模型的建立,并通过实验验证方法的可行性。尽管传感器融合技术需要一定的配置和成本投入,但它的优势在于提供了一种准确、可靠的非接触式测量方式,提高了检测效率,有效地确保了大型观览车的运行安全性。

2 摆角测量系统组成及原理

2.1 摆角测量系统组成

测量系统组成如图 1 所示,主要由数据采集、位姿调整、数据传输、数据处理及供电等部分组成。数据采集部分由激光雷达、监控相机组成。位姿调整部分主要由设备外壳与带有球形云台的承重三脚架组成。供电部分为带有交流与直流电插口的户外大容量电源。测量系统示意图如图 2 所示。

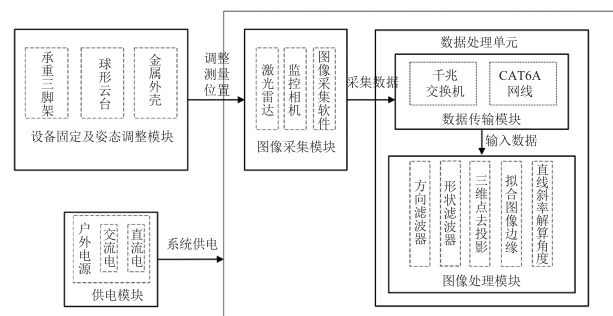


图1 测量系统组成

Fig. 1 Measurement system components

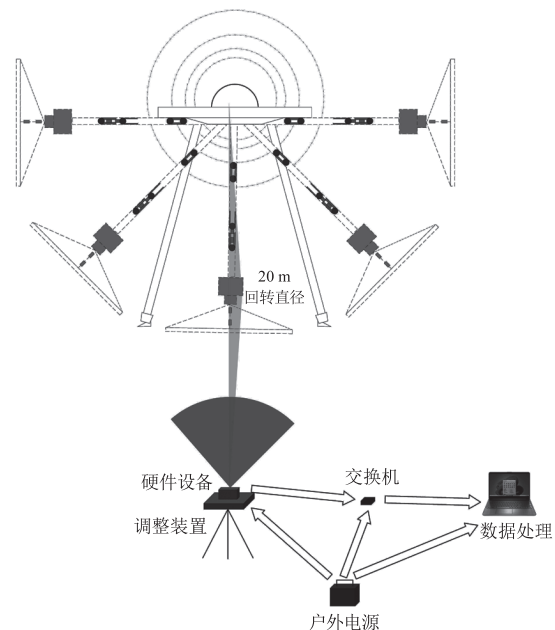


图2 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system

2.2 摆角测量系统原理

测量流程如图 3 所示,首先,利用标定完成的激光雷达与监控相机扫描获得目标区域的三维点云后,接

着,通过方向滤波器找到观览车四个支撑腿的点云数据并拟合出两个平面向内截选即为摆臂部分的点云,然后将得到的摆臂点云数据通过形状滤波器将摆臂不规则的点云数据进行滤波处理,最后将被测物摆臂的三维点云投影到二维平面上,通过过滤边界毛刺、平滑处理后找到两条外边界,利用最小二乘法拟合求得摆臂两边直线利用斜率解算出摆臂运动的摆角。

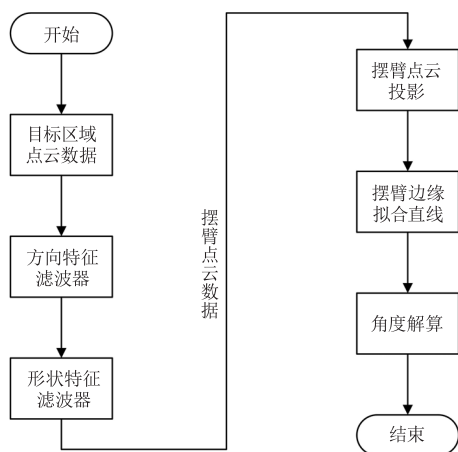


图3 大型观览车摆角检测流程图

Fig. 3 Flow chart of large-scale observation car swing-angle inspection

激光雷达与监控相机的联合标定技术是数据处理的前提^[18-19],将激光雷达的坐标系转换到监控相机坐标系,从而确保激光雷达朝向正确并找到测量系统正对着观览车的投影平面。相机内参可以通过张正友标定法得到,激光雷达和监控相机的外参可以通过扫描标定板并手动拾取标定板的4个角点点云,同时将图片数据拾取标定板的4个角点坐标将这一对像素坐标的点到点距离构建误差方程,转换为最小二乘问题求解得到。特征标定板为50 cm × 50 cm的正方形,如图4所示。

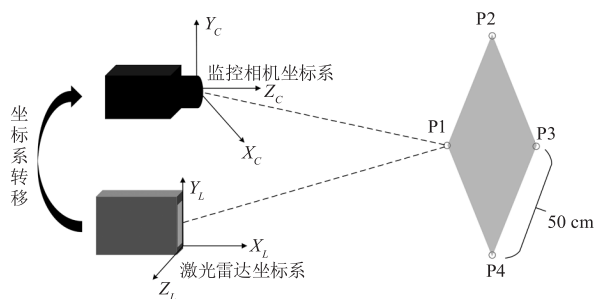


图4 标定示意图

Fig. 4 Calibration schematic

3 基于特征滤波的目标点云处理

3.1 基于方向特征的滤波器算法

由于现场测量环境较为复杂,获取点云数据

噪声较多^[20],处理起来较为复杂,因此将待测区域提取出来对于后续数据处理尤为重要,针对这个问题,本文使用了一种基于方向特征的滤波器算法,大型观览车的支撑腿倾斜角度基本一致,通过点云法线估计通过找到被测物的四个支撑腿部分,将前后两对支撑腿拟合一个基准平面进行范围截取可以去除大部分的噪声点并得到观览车部分的点云。

首先,对于点云数据 P 中每个点 p ,计算其法向量 n ,然后将点分为聚类候选集,并选取最近的 k 个邻居点作为聚类候选集 $N(p)$,距离 d 可以使用欧氏距离计算,具体计算公式为:

$$d = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} \quad (1)$$

其中, (x, y, z) 是候选点的坐标; (x_k, y_k, z_k) 为候选点附近第 k 个点的坐标。

接着,对于每个聚类候选集 $N(p)$,计算其中所有点的平均法向量 $m_n(P)$ 。这个平均法向量可以看作是聚类的法向量代表,其计算公式如下:

$$m_n(P) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k n_i \quad (2)$$

其中, n_i 是 $N(p)$ 中第 i 个点的法向量。

然后,通过比较点的法向量与聚类的平均法向量之间的差异,其计算公式如下:

$$d_n(p) = |n - m_n(p)| \quad (3)$$

其中, n 是点 p 的法向量。

从每个聚类候选集 $N(p)$ 中选取具有最小 $d_n(p)$ 值的点作为聚类中心 c 。将点云数据 P 中的每个点 p 分配到最近的聚类中心 c 中,得到初始聚类结果 C 。之后每个点将被标记为属于某个聚类。

接下来,根据点的位置信息,计算每个聚类的平均位置 $m_pos(C_i)$,这个平均位置代表了聚类的中心位置,可以通过公式(6)得到,之后,利用公式(7)计算每个聚类中所有点到平均位置的距离 $d_n_pos(C_i)$ 。

$$m_pos(C_i) = \frac{1}{|C_i|} \sum_{j=1}^{|C_i|} pos_j \quad (4)$$

$$d_n_pos(C_i) = |pos - m_pos(C_i)| \quad (5)$$

其中, pos_j 是 C_i 中第 j 个点的位置; pos 是 C_i 中点的位置。

最后,设置阈值 T ,用于判断聚类是否为同一物体的标准,如果存在某个聚类 C_i ,其中所有

点到平均位置的距离 $d_{n_pos}(C_i)$ 都小于阈值 T , 则将该聚类 C_i 中的所有点标记为同一物体, 即 $S_i = C_i$ 。将代表支撑腿的 S_i 找出来并将前后各两个支撑腿所在平面作为基准面向内筛选点云数据。

3.2 基于形状特征的滤波器算法

由于观览车表面特征复杂, 导致直接投影拟合直线时会有较大的偏移, 为确测量角度的准确性, 得到观览车摆臂部分的点云数据后, 在进行三维点云投影之前需要将观览车摆臂不平整的点云进行处理, 最后只保留观览车摆臂点云数据, 对此, 本文使用了一种基于形状特征的滤波器算法, 可以达到向下采样同时不破坏点云本身几何结构的功能, 此外可以去除一定程度的噪音点及离群点。

通过计算摆臂边缘点云的最大宽度并在该点云数据设置 Z 轴的范围, 将摆臂上座椅或者装饰物的点云数据剪除, 最后将点云数据体素化, 使边缘更加平滑。

首先, 摆臂点云数据在空间分布有一定空间特征, 沿 z 向分布较广, x, y 方向的分布处于有限范围内。此时确定点云在 z 方向上的范围, 可较快剪除离群点, 达到第一步粗处理的目的。

接着, 根据摆臂点云数据, 求取 X, Y, Z 三个坐标轴上的最大值 $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ 和最小值 $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$, 利用最大值与最小值计算立方体范围截选摆臂点云数据, 具体公式为:

$$\begin{cases} l_x = x_{\max} - x_{\min} \\ l_y = y_{\max} - y_{\min} \\ l_z = z_{\max} - z_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

然后, 输入截选的摆臂点云, 设定的小立方体边长 cl , 通过公式(7)将该大立方体 X, Y, Z 三个坐标轴分割成均等的 $M \times N \times L$ 份小立方体。通过公式(8)对于每一个小立方体进行编号, 编号为 (i, j, k) , 对立方体内的点, 通过公式(9)计算该质心, 并用该质心的坐标来近似该立方体内的若干点。

$$\begin{cases} M = \lfloor \frac{l_x}{cl} \rfloor \\ N = \lfloor \frac{l_y}{cl} \rfloor \\ L = \lfloor \frac{l_z}{cl} \rfloor \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i = \lfloor \frac{x_i - x_{\min}}{cl} \rfloor \\ j = \lfloor \frac{y_j - y_{\min}}{cl} \rfloor \\ k = \lfloor \frac{z_k - z_{\min}}{cl} \rfloor \end{cases} \quad (8)$$

$$c_{ijk} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i \quad (9)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整, c_{ijk}, p_i, k 分别表示立方体的质心, 数据点, 点的数量。

最后, 得到单独识别出来的边缘平滑的摆臂部分三维点云数据。



图5 摆臂部分点云

Fig.5 Point cloud of swingarm section

4 基于投影转换的角度解算

直接使用三维点云求摆臂部分的方向向量与地面法向可以解算得到夹角, 但角度解算需要完整且平滑的边界, 摆臂在运动过程中的某一帧比较粗的时候或者边界不够平滑的时候, 拟合的方向向量带有偏移, 解算的角度误差较大, 导致测量效率以及测量精度没有二维图像高, 而投影的关键特点在于它保持了物体在投影平面上的尺寸和形状不变^[21], 只关注点云数据在水平和垂直方向上的位置, 所以本文采用三维点云投影二维平面进行边缘拟合直线求解。

具体的投影转换坐标可以通过以下步骤得到, 将测量系统正对着的平面表示为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (10)$$

假设 $(a_1, b_1, c_1), (a_2, b_2, c_2)$ 为平面上两个点, 那么可以得到:

$$A(a_2 - a_1) + B(b_2 - b_1) + C(c_2 - c_1) = 0 \quad (11)$$

$(a_2 - a_1, b_2 - b_1, c_2 - c_1)$ 为该平面上的一个向量, 根据公式(11)可知, (A, B, C) 与这个向量垂

直,则 (A, B, C) 为该平面的法向量。

假设 (a_0, b_0, c_0) 为摆臂点云中任意一点,该点在平面上的投影坐标为 (a, b, c) ,那么由这两个点组成的向量也是该平面的法向量,应与法向量 (A, B, C) 平行,从而得到:

$$\frac{a - a_0}{A} = \frac{b - b_0}{B} = \frac{c - c_0}{C} \quad (12)$$

$$\text{即 } x = At + a_0; y = Bt + b_0; z = Ct + c_0 \quad (13)$$

将上述结果代入投影平面方程式(10)中得到:

$$t = -\frac{Aa_0 + Bb_0 + Cc_0 + D}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (14)$$

将公式(14)代入公式(13)即可解算出投影后的坐标。

具体来说,投影使用了点云数据中的坐标信息,根据本文中测量系统的坐标系,将每个点的三维坐标 (X, Y, Z) 映射到一个测量系统正对的二维平面上的位置 (y, z) 。这个映射过程可以通过简单的线性变换来实现,由于投影解算角度不需要深度信息,将 X 坐标忽略,其中 (Y, Z) 的坐标直接映射到平面上。这个投影过程使得后续的数据处理更加简化,特别是在进行边缘检测和角度解算时,因为在平面上的点云更容易处理和分析。

将当前帧的点云数据投影至二维图像后,对所得图像的两侧边缘进行平滑处理并拟合出直线,将更为光滑的一侧选取为对象进行角度解算。由公式(15)得到 $\hat{y} = \hat{k}x + \hat{b}$ 。

$$\begin{cases} \hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \\ \hat{b} = \bar{y} - \hat{k} \bar{x} \end{cases} \quad (15)$$

则角度 α 可以通过公式(16)求出来:

$$\alpha = \arctan k \quad (16)$$

α 即所求角度,如图6所示。



图6 拟合解算角度

Fig. 6 Fitting solution angle

5 实验验证

5.1 实验目的

根据国标 GB 8408 - 2018《大型观览车安全规范》中规定,针对大型观览车角度测量的倾角仪精度要求为 $\pm 0.5^\circ$,为此,需要对测量系统的精度进行评定。

5.2 模型实验

为验证本文摆角测量系统的测量精度,设计通过使用全站仪测量特征点坐标拟合直线求斜率解算角度的方案,其次采用本文所提出的基于方向滤波器与形状滤波器的点云处理方法进行角度测量,得出两种方法的测量结果并对比分析精度。现场测量目标高度为 10 m,测量距离为 20 m,对此模型实验中模型最大高度设计为 2.5 m,测量距离设置为 5 m,并在模型摆臂上等距布置特征点。

本次实验使用的全站仪型号为 Leica-TM50,测量时误差为 2 mm。硬件验证平台如图7所示。实验采用的激光雷达型号为 Livox-Hap 雷达,视场为 $120^\circ \times 25^\circ$,测距随机误差小于 2 cm,角度随机误差小于 1° ,ROI 区域分辨率为 $0.23^\circ \times 0.18^\circ$,监控相机型号为海康威视 DS-2CD7A47FWD-IZS,焦距 2.8 ~ 12 mm,像素 400 万。



图7 硬件实验平台

Fig. 7 Hardware experiment platform

通过在摆臂轴线方向均匀布置 5 个特征点,使用全站仪测量特征点在摆臂不同姿态下的特征点坐标,之后利用最小二乘法拟合直线求得斜率解算角度,最后与测量系统解算的角度进行对比,计算平均误差。

由于实际现场测量环境的具有一定的障碍物,本次模型实验将测量设备以被测模型为中心半径为 5 m 左右偏移 15° 进行测量,模型摆臂在不同角度下

采集数据进行模拟现场实验。具体数据如表1、2所示。

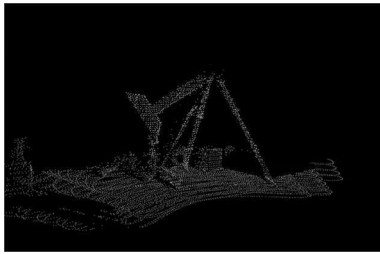


图8 等比例模型点云图

Fig. 8 Equal-scale model point cloud

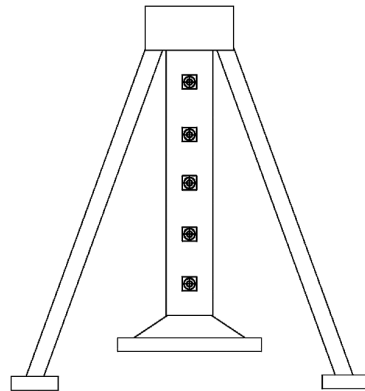


图9 被测物特征点位置

Fig. 9 Location of DUT feature points

表1 扫描设备左移动15°测量结果

Tab. 1 Scanning device shifted left by 15° measurement results

测量位置	地面法向量 X	地面法向量 Y	地面法向量 Z	测量系统度数/(°)	全站仪测量度数/(°)	误差/(°)
1	-0.00117	-0.00003168	0.999999	45.80	46.12	-0.32
2	-0.00097	0.00008679	1	52.13	52.58	-0.45
3	-0.00044	-0.0000667	1	57.73	58.06	-0.33
4	-0.00019	-0.0001218	1	64.86	64.53	0.33
5	0.00001	-0.0000007	1	67.66	67.34	0.32

表2 扫描设备右移动15°测量结果

Tab. 2 Scanning device shifted right by 15° measurement results

测量位置	地面法向量 X	地面法向量 Y	地面法向量 Z	测量系统/(°)	全站仪测量/(°)	误差/(°)
1	0.00047	0.0008399	1	50.89	50.63	0.26
2	-0.00009	-0.0010377	0.999999	59.75	59.91	-0.16
3	0.00067	0.0012704	0.999999	61.16	61.58	-0.42
4	0.00048	0.0008576	1	68.75	69.16	-0.41
5	0.00014	-0.0007265	1	71.86	71.55	0.31

由表1、2可以计算出测量系统在模型实验中测量平均误差绝对值为0.29°,最大误差绝对值为0.45°,本次实验为等比例模拟现场测量,由此可见,本方法具有较好的观览车摆角测量精度,可满足测量误差 $\pm 0.5^\circ$ 的要求。

5.3 实际测量

现场实际测量距离为15~20 m,通过现场不同位置的多次测量,本文所使用方法均能够准确快速的测量出大型观览车的摆角。

本文提出的测量方法在江西省南昌市南昌之星游乐园所应用,如图10所示。图(a)、图(b)为现场测量设备,图(c)为现场测量时的上位机界面。

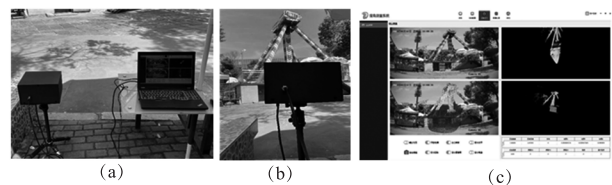


图10 现场测量

Fig. 10 On-site measurements

6 结论

本文利用激光雷达与视觉组合测量技术实现了观览车类大摆锤设备的摆角动态测量。通过采集观览车运行过程的激光点云与图像,对点云进行方向特征滤波和形状特征滤波得到摆臂部分点云;将所获取的摆臂部分三维点云投影至二维平面作为观览车最大摆角解算的重要依据,通过最小二乘法拟合

摆臂边缘获得摆角角度。通过搭建实验模型进行对比测量得到本文方法最大误差绝对值为 0.45° , 可满足 $\pm 0.5^\circ$ 的测量误差要求。

该方法能够在复杂环境下实现高精度、非接触式的动态摆角测量, 提高观览车类大摆锤设备摆角测量效率, 降低人工成本。通过进一步优化系统性能, 该方法可进一步扩展应用于其他具有摆角监测需求的大型观览车设备, 如海盗船, 悬崖秋千等, 或是在施工现场监测起吊机、挖掘机、塔吊等以提升大型设备现场工作的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] ShanYujia. Research on safety integrity evaluation method of control system of large-scale amusement facilities[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2019. (in Chinese)
单宇佳. 大型游乐设施控制系统的安全完整性评价方法研究[D]. 北京:北京化工大学,2019.
- [2] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 大型游乐设施安全规范:GB8408—2018[S]. 北京: 中国标准出版社,2018.
- [3] Wei Zhenzhong, Feng Guangkun, Zhou Danya, et al. Review of posture visual measurement methods and applications[J]. Progress in Laser and Optoelectronics,2023,60(3):144-176. (in Chinese)
魏振忠, 冯广堃, 周丹雅, 等. 位姿视觉测量方法及应用综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 144-176.
- [4] Zhang S, Zhao X, Lei W, et al. Front vehicle detection based on multi-sensor fusion for autonomous vehicle[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(1): 365-377.
- [5] Chang Rui, Song Haifeng. Research on detection technology of small and medium-sized obstacles in parking[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(6):169-177. (in Chinese)
常睿, 桑海峰. 泊车中小型障碍物检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(6):169-177.
- [6] Xing Xueliang, Gan Wenbo, Jiang Chaogen. Dimensional detection technology of aviation rivets based on machine vision[J]. Journal of Metrology,2020,41(5):518-523. (in Chinese)
邢雪亮, 甘文波, 蒋朝根. 基于机器视觉的航空铆钉尺寸检测技术[J]. 计量学报, 2020,41(5):518-523.
- [7] Wang Qiong, Wang Haiyan, Sun Baoqun, et al. Research and improvement of point cloud reduction algorithm in vehicle surface reconstruction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2017,31(11):1693-1701. (in Chinese)
王琼, 王海燕, 孙保群, 等. 车辆曲面重构中点云精简算法的研究与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11):1693-1701.
- [8] Tao Chongxi, Qiao Li, Sun Yunfei, et al. Stereo matching algorithm of hexacopter UAV based on binocular vision [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(9): 1181-1187. (in Chinese)
陶重彝, 乔荔, 孙云飞, 等. 基于双目视觉的六旋翼无人机立体匹配算法[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1181-1187.
- [9] Wang Jie, Chen Zhengwei, Xu Zhaosheng, et al. Inter-row navigation method of greenhouse robot based on camera and lidar fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 32-40. (in Chinese)
王杰, 陈正伟, 徐照胜, 等. 基于相机与激光雷达融合的温室机器人行间导航方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 32-40.
- [10] Li Maoyue, Ma Kangsheng, Wang Fei, et al. Research on blade point cloud preprocessing method based on machine-based structured light measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 55-66. (in Chinese)
李茂月, 马康盛, 王飞, 等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 55-66.
- [11] Liang Tianwei, Zhu Chengxiang, Chen Hao. 3D measurement of QFP chip pin based on point cloud processing [J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 556-560. (in Chinese)
梁天为, 朱呈祥, 陈浩. 基于点云处理的 QFP 芯片引脚三维测量[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 556-560.
- [12] Zhu, Dingkun, et al. Nonlocal low-rank point cloud denoising for 3-D measurement surfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [13] Liu Yonggang, Yu Fengning, Zhang Xinjie, et al. Research on 3D target detection based on laser point cloud and image fusion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 289-299. (in Chinese)
刘永刚, 于丰宁, 章新杰, 等. 基于激光点云与图像融

- 合的3D目标检测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 289 - 299.
- [14] Gu Xiao. Research on the application of UAV airborne LiDAR in geological mapping and engineering surveying [J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1126 - 1131. (in Chinese)
谷潇. 无人机机载激光雷达在地质测绘与工程测量中的应用研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1126 - 1131.
- [15] Yu Bingchen, Chen Gang, Duan Miaoran, et al. Application of UAV remote sensing in three-dimensional reconstruction of large immovable cultural relics [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2017(5): 43 - 46, 61. (in Chinese)
于丙辰, 陈刚, 段淼然, 等. 无人机遥感在大型不可移动文物三维重建中的应用[J]. 测绘通报, 2017(5): 43 - 46, 61.
- [16] Li Fabin. Tilt measurement of power pole tower based on airborne visible light and lidar technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)
李法斌. 基于机载可见光与激光雷达技术的电力杆塔倾斜测量[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [17] Wang Shengjie, Liu Bo, Li Heping. Moving target pose estimation of super-resolution area array lidar [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(3): 448 - 454. (in Chinese)
王盛杰, 刘博, 李和平, 等. 超分辨率面阵激光雷达的动目标姿态估计[J]. 半导体光电, 2020, 41(3): 448 - 454.
- [18] Song Wensong, Zhang Zonghua, Gao Nan, et al. Spatial pose calibration method of lidar and camera based on intensity information [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(2): 356 - 364. (in Chinese)
宋文松, 张宗华, 高楠, 等. 基于强度信息的激光雷达和相机空间位姿标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 356 - 364.
- [19] Li Shuqing, Xing Xinlong, Lin Jingyu. A calibration method for three-dimensional lidar system [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 182 - 187. (in Chinese)
李树青, 邢鑫龙, 林靖宇. 一种三维激光雷达系统标定方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 182 - 187.
- [20] Chen Chuxia, Ding Yong. Edge feature extraction method of lidar image based on median filtering [J]. Laser Journal, 2023, 44(8): 94 - 98. (in Chinese)
陈初侠, 丁勇. 基于中值滤波的激光雷达图像边缘特征提取方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(8): 94 - 98.
- [21] Han Fenglin, Li Weijian, Su Bin, et al. Aerospace blade position recognition based on 3D point cloud boundary point features [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1 - 24 [2023 - 11 - 17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20231020.1756.016.html>. (in Chinese).
韩奉林, 李伟健, 苏斌, 等. 基于3D点云边界点特征的航空叶片位姿识别[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1 - 24 [2023 - 11 - 17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20231020.1756.016.html>