堆取料机激光雷达系统参数的校准

路万林，熊文羽，姜炎城，刘礼杰
(中冶南方工程技术有限公司，湖北 武汉 430023)

摘要：料场在堆取料机上安装激光雷达扫描仪可以获取料堆三维模型、实现堆取料的自动化。针对由于激光雷达系统的安装参数不易直接测量，且参数误差对料堆三维成像效果影响很大，堆取料机上激光雷达系统的参数难校准的问题，本文提出了一套激光雷达系统参数校准的方法，其先根据堆取料机的结构建立各个关节的坐标系，然后根据各个坐标系之间的相对位置关系测量激光雷达系统的参数初始值，最后根据激光雷达扫描到的现场墙面信息建立优化问题，并设计遗传算法求解该优化问题得到最终的系统参数。校准标定后的料场三维模型效果表明，该方法具有很强的实用价值。

关键词：激光雷达；参数标定；堆取料机；点云；遗传算法
中图分类号：TF31；TN249；TN958.98；TF089　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2023)01－0093－05
doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.014

Calibration of lidar system parameters of stacker-reclaimer

LU Wanlin，XIONG Wenyu，JIANG Yancheng，LIU Lijie
(*WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited*，*Wuhan* 430023，*Hubei*，*China*)

Abstract：The three-dimensional model of the stock pile can be obtained and the automation of stacking and reclaiming can be realized by installing lidar scanner on stacker-reclaimer in stockyard. Aiming at the problems that the installation parameters of the lidar system are not easy to measure directly，the parameter error has a great impact on the three-dimensional imaging effect of the stock pile，and the parameters of the lidar system on the stacker-reclaimer are difficult to calibrate，a set of methods for parameter calibration of the lidar system is proposed，which first establishes the coordinate system of each joint according to the structure of the stacker-reclaimer，and measures the initial value of the parameters of the lidar system according to the relative position relationship between the coordinate systems，then establishes the optimization problem according to the on-site wall information scanned by the lidar，and finally designs a genetic algorithm to solve the optimization problem and obtain the final system parameters. The effect of the three-dimensional model of the stockyard after calibration shows that the method has strong practical value.

Key words：lidar；parameter calibration；stacker-reclaimer；point cloud；genetic algorithm (GA)

近年来，为了实现原料场堆取料机的全自动化，很多企业在堆取料机的悬臂上安装了激光雷达系统。该系统通过堆取料机的平移、俯仰和回转来扫描料堆，实时获取现场料堆的三维模型，进而实现全自动化堆取料作业。料堆三维模型能准确获取的前提是激光雷达的安装参数能准确校准，由于原料场需要扫描的范围很大(半径几十米)，安装参数微小的偏差都会带来较大的三维模型误差[1－3]。

堆取料机上的安装参数分两类：一类为偏

收稿日期：2022－10－26；**修回日期**：2022－11－15
基金项目：863 计划(2014AA041803)
作者简介：路万林(1982—)，男，高级工程师，从事钢铁企业自动化、智能化方面的研究。
通信作者：熊文羽(1992—)，男，博士，从事冶金自动化方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

移参数，由激光雷达光学中心和世界坐标系原点的相对位置关系决定，偏移参数有 3 个，分别是沿 x 轴、y 轴和 z 轴方向的偏移；另一类为旋转参数，由激光雷达坐标系和世界坐标系的旋转决定，旋转参数同样有 3 个，分别是绕 x 轴、y 轴和 z 轴 3 个轴向的旋转。由于这几个参数都不易准确测量，且对激光雷达三维成像效果影响很大，激光雷达系统的参数校准成为堆取料机全自动化路上的一个难题。

目前，激光雷达安装参数校准方法的相关研究比较多。比如：韦邦国等[4]利用遗传算法完成了移动机器人双雷达系统安装参数的标定优化，由于文章中所提到的移动机器人只限于平面移动，所以该算法只能标定出一个旋转参数和两个偏移参数；程金龙等[5]针对车载激光雷达，提出了一种采用三面靶标的激光雷达参数标定方法，三面靶标为三个互不共面且两两相交的平面，在不同坐标系下计算标靶的法向量以及面和面的交线，然后根据这些向量计算两个坐标系的旋转和偏移参数；黄风山等[6]通过放置特定结构件的方式来标定扫描仪的参数，其放置了一个中心含有一个三棱柱通孔的长方体，利用激光雷达扫描平面和中空三棱柱以及长方体棱边交割形成的几何三角形，通过建立线性几何三角函数关系来标定激光雷达的参数。PING 等[7]、KHURANA 等[8]也做过类似的试验。这种放置标定器件的方式在实验室内使用能有比较好的效果，但是在原料场现场，由于场地面积大，激光雷达扫描距离长，需要使用的标定器件也会很大，所以这种方式难以用于堆取料机上的激光雷达参数标定上。另外一种方式是在堆取料机上安装三维激光雷达，或者集成云台和二维激光雷达[9-10]，这种方法可以使用标定器件的前提是在实验室标定好云台和激光雷达的相对位置关系，然后在原料场直接使用点云配准的方式来标定云台的安装参数，但是这种方式增加了一定的成本。

针对以上激光雷达安装参数校准方法中存在的问题，本文根据现场实际情况，提出了一种基于墙面信息的激光雷达参数的校准方法，先根据堆取料机的结构建立各个关节和扫描仪的坐标系，然后根据建立的坐标系使用手持水平仪，手持激光测距仪、重锤卷尺等工具直接或间接地粗略测量激光雷达的参数初始值，并使用这个初始值扫描现场点云数据，最后将点云数据里面的墙面数据分割出来，以墙面上所有点共面的信息来修正参数的初始值得到最终值。现场三维数据试验表明，所提的方法具有很好三维成像效果。

1 激光雷达系统校准方法

1.1 坐标系的建立

堆取料机可以当作有 3 个自由度的机械臂，3 个自由度分别对应 3 个关节：平移关节、回转关节和俯仰关节。平移即堆取料机沿着轨道移动，回转即堆取料机的大臂绕着垂直于地面的向量旋转，俯仰则是堆取料机绕着轨道方向的旋转。针对堆取料机的每个关节建立坐标系，并建立固定的世界坐标系和以激光雷达光学中心为原点的激光雷达坐标系，如图 1 所示。其中，O_1 为世界坐标系的原点，O_2 为移动关节坐标系的原点，回转关节和俯仰关节坐标系原点重合，分别为 O_3 和 O_4，O_5 为激光雷达坐标系。

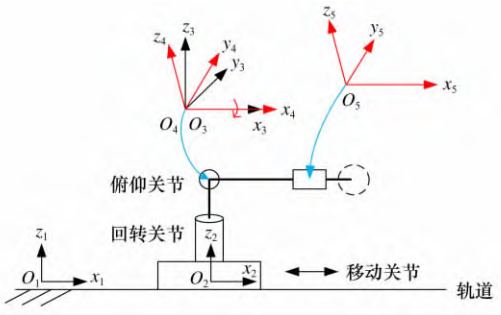


图 1 堆取料机坐标系的建立

Fig. 1 Establishment of stack-reclaimer coordinate system

1.2 激光雷达系统参数初始值标定

1.2.1 偏移三参数的初始值标定

平移三参数中沿轨道(x 方向)和重力方向(z 方向)上的偏移主要靠卷尺或测距仪直接测量，沿 y 轴方向上的偏移的初始值标定示意如图 2 所示。

具体操做流程：①大臂俯仰角设置成0°；

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

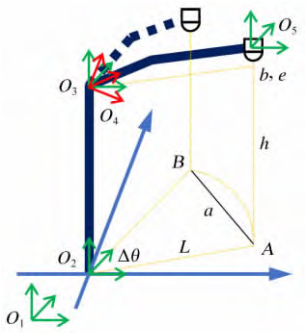


图 2　沿 *y* 轴方向上偏移的初始值标定示意

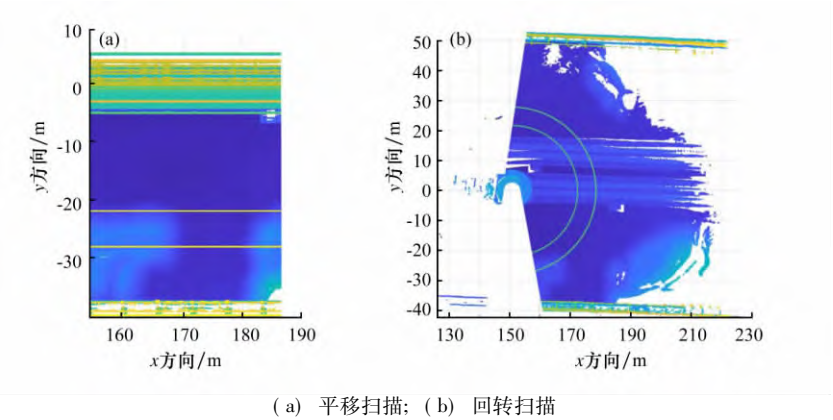
Fig. 2　Schematic diagram of initial value calibration of offset in *y*-axis direction

② 将重锤从激光扫描仪中心处下放到地面，并标记为 A 点；③ 控制大臂回转 $\Delta\theta$(蓝色虚线位置) ，重锤到地面 B 点；④ 在地面上测量 AB 之间的距离 a；⑤ 测量重锤拉线长度 h(扫描仪到地面高度) ；⑥ 测量扫描仪到大臂的横向和纵向偏移 b，e；⑦ 根据等腰三角形 AOB，结合底边长度a以及顶角角度$\Delta\theta$计算扫描仪中心离回转中心的距离 L。

1.2.2　旋转三参数的初始值标定

旋转三参数的初始值标定直接用手持水平仪测量，但是只能粗略的测量扫描仪本身的俯仰角度(绕 x 轴旋转) 和偏转角度(绕 y 轴旋转) ，回转角度(绕 z 轴旋转) 无法直接测量。

总的来说，初始值的标定由于扫描仪光学中心位置无法确定，测量过程中存在误差等原因，标定的初始参数会存在一定的偏差，不能直接用于料场三维模型建立。图 3 给出直接使用标定的初始值建立的高炉料场的三维模型的俯视图，左右两图分别对应堆取料机平移和回转扫描出来的料场模型。从图 3 中可以看出，回转扫描出来的模型轨道方向与 x 轴不平行，而平移扫描出来的模型轨道方向与 x 轴平行，同一个扫描仪不同姿态扫描出来的料场三维模型不一致，所以这组标定参数不能直接用于无人化取料策略的设计。



(a)　平移扫描; (b)　回转扫描

图 3　同一台激光雷达不同堆取料机姿态下的扫描模型俯视

Fig. 3　Top view of the scanning model of the same lidar in different stacker-reclaimer attitudes

1.3　基于墙面信息的激光雷达系统参数校准方法

料场由于面积大，激光雷达扫描距离长，定制标定器件的方法不适用于这种情况，经过现场勘查，可以使用料堆挡墙当作参考面(如果没有料堆挡墙，可以使用料棚的端面或者地面) 来校准激光雷达的安装参数。

1.3.1　旋转参数和平移参数的解耦

假定墙面是一个平面，则扫描仪的一帧在墙上的点是一条直线。设墙面上任意两点在扫描仪坐标系下的坐标为 q_1、q_2，在世界坐标系下的坐标为 p_1、p_2，则有:

$$\begin{aligned} p_1 &= Q(R_\omega q_1 + t) \\ p_2 &= Q(R_\omega q_2 + t) \end{aligned} \tag{1}$$

式中: Q 为堆取料机姿态变化所代表的矩阵; t 代表扫描仪光学中心相对于堆取料机回转中心的偏移向量; R_ω 为扫描仪坐标系相对于回转坐标系的旋转矩阵，可以表示:

$$R_\omega = R_z(\omega_z)\, R_y(\omega_y)\, R_x(\omega_x) \tag{2}$$

式中: ω_z、ω_y、ω_x 分别为绕 z、y、x 轴旋转的角度，可以分别表示[10]:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$R_z(\omega_z)=\begin{bmatrix}\cos\omega_z & -\sin\omega_z & 0\\ \sin\omega_z & \cos\omega_z & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$R_y(\omega_y)=\begin{bmatrix}\cos\omega_y & 0 & \sin\omega_y\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\omega_y & 0 & \cos\omega_y\end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_x(\omega_x)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\omega_x & -\sin\omega_x\\ 0 & \sin\omega_x & \cos\omega_x\end{bmatrix}$$

式(1)中的两个式子相减得:

$$d=p_1-p_2=QR_\omega(q_1-q_2) \quad (4)$$

式中: d 为平行于墙面的向量，且方向与扫描仪的同一帧在墙上的组成的直线相同。

从式(4)可以看出，这个向量只与扫描仪的旋转参数有关，与扫描仪的平移参数无关。根据这个信息，可以先估算旋转参数，再估算平移参数，实现平移参数和旋转参数的解耦。

1.3.2 设计旋转参数的目标函数

如果墙面是平面，则所有平行于墙面的向量都和墙面的法线垂直，所以有旋转参数的目标函数:

$$C_R=\hat{D}n=[\hat{d}_1\ \hat{d}_2\cdots\hat{d}_N]\ n \quad (5)$$

式中: n 为墙平面的法向量，C_R 为旋转参数的目标函数，d_i 为式(4)中导出的平行于墙面的向量，D 为向时 d_i 构成的列向量矩阵。

理想情况下，由于法向量垂直于平面，所以目标函数 C_R 的最小值为0，可以通过求解 C_R 最小值的旋转矩阵，来计算出旋转参数。

1.3.3 设计平移参数的目标函数

如果墙面是平面，墙面上点的坐标和墙面的法向量相乘是一个常数，即 p^Tn 是常数，所以有平移参数的目标函数

$$C_T=\mathrm{std}\left(\begin{bmatrix}p_1^Tn\\ p_2^Tn\\ \cdots\\ p_n^Tn\end{bmatrix}\right) \quad (6)$$

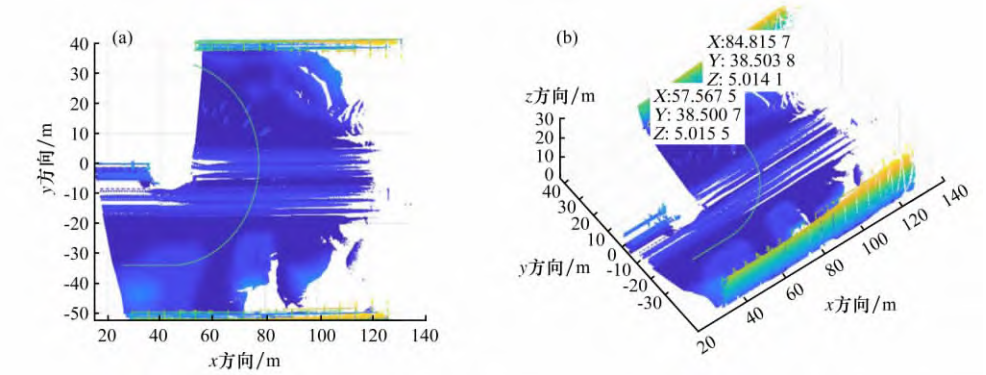
式中: C_T 为平移参数的目标函数，p_i 为世界坐标系下墙面上点的坐标，std()为标准差函数。

1.3.4 标定方法的程序实现流程

结合现场情况，以及目标函数关系，标定方法的程序实现流程: ① 根据初始测量值，扫描原料场信息并画出料场的基本三维模型; ② 在上述原料场的三维模型中截取包含墙平面的点云数据; ③ 使用 RANSAC(随机采样一致性算法)拟合上述墙平面的点云数据，拟合平面的内点即可以认为是墙上的点; ④ 反算出墙上点在扫描仪坐标系下的坐标，并使用最小二乘拟合墙面上同一帧的点，取相关系数 >0.996 的点并计算直线的斜率; ⑤ 所有直线对应的向量计算式(5)中目标函数 C_R 并使用基因遗传算法求解使 C_R 最小的旋转参数; 根据墙上点的坐标计算式(6)中平移目标函数 C_T，同样使用遗传算法求解使 C_T 最小的平移参数。

2 料场三维模型效果

标定后扫描仪采集的点云数据建立的料场三维模型如图4所示。从俯视图可以看出，轨



(a) 俯视图; (b) 轴视图

图 4 标定后料场三维模型效果

Fig. 4 3D model effect of stockyard after calibration

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

道方向和 x 轴方向基本保持平行，从右侧墙顶坐标可以看出，不同位置的墙高基本一致(5 m)，墙顶的 y 轴坐标也基本一致，根据所提方法标定出的参数建立的料场三维模型效果良好。

3　结　语

本文提出了一种堆取料机上激光雷达系统参数的校准方法，在使用工具粗略测量的基础上，增加了基于料场墙面点云信息的激光雷达参数修正方法，料堆三维模型数据表明，所提方法能很好的估算激光雷达系统的安装参数，具有很强的实用价值，该方法适用于所有摇臂式堆料机或堆取料机，已在新钢综合料场的高炉料场堆取料机、混匀料场堆料机和熔剂料场堆料机上使用。

参考文献:

[1] 韩立民. 混匀料场堆料机自动控制及扫描系统的开发[J]. 河北冶金,2020(S1):107－110.
HAN Limin. Development of automatic control and scanning system for stacker in blending yard[J]. Hebei Metallurgy, 2020(S1):107－110.

[2] BILLAH M, FARRELL J A. Real-time time-varying surface reconstruction and edge point extraction for bucket wheel reclaimers[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications(CCTA). Hong Kong: IEEE,2019:19－21.

[3] 刘怡,杨博,林涛,等. 三维数字化料场系统在智能化原料场的应用[J]. 冶金自动化,2021,45(3):110－115.
LIU Yi,YANG Bo,LIN Tao,et al. Application of 3D digitized material yard system in intelligent material yard[J]. Metallurgical Industry Automation,2021,45(3):110－115.

[4] 韦邦国,宋韬,郭帅. 遗传算法在双激光雷达位姿标定中的应用[J]. 计量与测试技术,2019,46(3):91－95.
WEI Bangguo,SONG Tao,GUO Shuai. Application of genetic algorithms in position and pose calibration of dual LIDAR[J]. Metrology & Measurement Technique,2019,46(3):91－95.

[5] 程金龙,冯莹,曹毓,等. 车载激光雷达外参数的标定方法[J]. 光电工程,2013,40(12):89－94.
CHENG Jinlong,FENG Ying,CAO Yu,et al. Extrinsic calibration method for multiple lidars mounted on mobile vehicle[J]. Opto-Electronic Engineering,2013,40(12):89－94.

[6] 黄风山,马帅,薛泽. 旋转二维激光雷达测量系统及其标定方法[J]. 光电子·激光,2018,29(9):987－995.
HUANG Fengshan,MA Shuai,XUE Ze. A rotating two-dimensional laser radar measurement the calibration method[J]. Journal of Optoelectronics·Laser,2018,29(9):987－995.

[7] GAO Zhe,HUANG Jun,YANG Xiaofei,et al. Calibration of rotating 2D LIDAR based on simple plane measurement[J]. Sensor Review. Sensor Review,2018,39: SR－11－2017－0237.

[8] KHURANA A,NAGLA K S. An improved method for extrinsic calibration of tilting 2D LRF[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2020,99(3－4):693－712.

[9] 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.
LI Shuqing,XING Xinlong,LIN Jingyu. A calibration method for 3D lidar system[J]. Laser & Infrared,2022,52(2):182－187.

[10] 尚涛,贺会超,王昕,等. 二维激光雷达实现三维成像的算法[J]. 吉林大学学报(工学版),2012,42(S1):91－95.
SHANG Tao,HE Huichao,WANG Xin et al. An algorithm of 3D imaging with 2D lidar[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2012,42(S1):91－95.

[11] JOHN J C. 机器人学导论[M]. 第三版. 北京:机械工业出版社,2006:14－42.
JOHN J C. Introduction to robotics mechanics and control[M]. Third Edition. Beijing: China Machine Press,2006:14－42.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net