

多视角转台双姿态构建钕铁硼永磁体点云模型

郑胜^{1,2}, 李占福^{1,2}, 林泽^{1,2}, 童昕^{1,2}

- (1. 福建理工大学机械与汽车工程学院, 福建福州 350118;
2. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建福州 350118)

摘要: 针对钕铁硼永磁体产线快速检测与缺陷反馈工艺系统对表面结构完整性及细节特征定量表征的需求, 及传统单视角采集存在的覆盖率不足、缺陷细节丢失等问题, 提出一种基于多视角转台与双姿态配合的钕铁硼永磁体三维点云构建方法。通过转台参数标定与标定块姿态变换配准, 对永磁体在两种固定姿态下的点云进行拼接融合。实验结果表明, 多视角双姿态点云重建方法能够实现表面覆盖率超过95%的三维点云重建, 点云拼接精度的均方根误差为0.15 mm, 可用于永磁体三维表面缺陷分析。

关键词: 钕铁硼永磁体; 三维点云; 多视角拼接; 姿态配准

中图分类号: TH741.8

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0074-07

Multi-view turntable and dual-pose based point cloud modeling of NdFeB permanent magnets

ZHENG Sheng^{1,2}, LI Zhanfu^{1,2}, LIN Ze^{1,2}, TONG Xin^{1,2}

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To address the need for quantitative characterization of surface structural integrity and fine features in the rapid inspection and defect feedback system for neodymium-iron-boron (NdFeB) permanent magnet production lines, and to overcome limitations such as insufficient coverage and loss of defect details caused by traditional single-view acquisition, a 3D point cloud reconstruction method is proposed based on a multi-view turntable and dual-pose coordination. By calibrating turntable parameters and performing pose transformation-based registration using a calibration block, point clouds of the permanent magnet under two fixed poses are aligned and fused. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a surface coverage of over 95% in 3D reconstruction, with a root mean square error of 0.15 mm in point cloud registration accuracy, making it suitable for 3D surface defect analysis of permanent magnets.

Keywords: NdFeB permanent magnets; 3D point cloud; multi-view stitching; pose registration

构建三维点云模型, 需对不同视角的点云数据进行配准与拼接, 其关键在于计算局部坐标系间的旋转和平移矩阵。Besl等^[1]提出的ICP(iterative closest point, 迭代最近点)算法应用广泛, 但对初始位姿较为敏感。Hou等^[2]提出基于相机标定提取光学中心轨迹的方法, 对图像质量要求

较高, 适应大视角变化能力有限。Yang等^[3]通过改进RANSAC(random sample consensus, 随机抽样一致性)算法参数并结合SVD(singular value decomposition, 奇异值分解)解析法向量, 提出一种标定方法, 但该方法在复杂环境下对噪声点和离群值的鲁棒性不足。Song等^[4]提出双转台角

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2023X0002); 福建省高校产学研合作项目(2024H6015)

第一作者简介: 郑胜(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 数字化设计与制造。

通信作者: 李占福(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 数字化设计与分析。

度抵消方法,结合 LCCE(layered circle center extraction,分层圆心提取)算法提升旋转轴估算精度,但系统结构复杂。Wei 等^[5]提出基于叶片法向量约束的自动视角规划方法,用于减少冗余数据,适用于小型植被。Luo 等^[6]通过标记点粘贴和全等三角形约束实现高精度拼接,但对人工操作水平依赖较大。莫彩利等^[7]提出基于靶点跟踪的无标志点扫描方法,降低了贴点引起的效率问题,但对转台定位精度依赖性高。秦琴等^[8]基于圆环校准件提出多视拼接方法,优化初始配准,但存在误差累积现象。

综上所述,现有方法在提升标定精度与拼接效率方面虽然取得进展,但普遍存在视角覆盖不足,难以补全物体上下表面的点云信息的问题。本文提出基于转台标定与标定块配准的多视角双姿态点云重建方法,可有效补全顶部和底部区域的点云数据,实现完整的三维点云重建。

1 钕铁硼永磁体表面典型缺陷

如图1所示,钕铁硼永磁体表面存在两处典型缺陷,均对磁体的磁性能与使用寿命产生不利影响。一处为缺角缺陷,缺陷沿样品边缘延伸,表现为局部材料的剥离和断裂,表面较为平滑,最大长度约 25 mm,最大宽度约 4 mm。一处为凹陷缺陷

陷,缺陷区域与周围材料之间存在明显的高度差异,边缘不规则且表面粗糙,最大长度约 15 mm,最大深度约 3 mm。两处缺陷分布在钕铁硼永磁体的不同位置,因此相机在一次拍摄中仅能获取局部区域的信息,无法获得缺陷的全部信息。

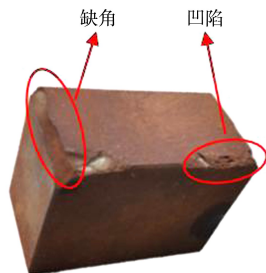


图1 钕铁硼磁体表面缺陷

Fig.1 NdFeB magnet surface defects

2 双姿态转台测量方法

2.1 转台参数标定

如图2所示,双目结构光相机与旋转平台相结合,从多个角度获取钕铁硼永磁体的三维点云数据。每个视角下的点云数据均位于各自的局部坐标系中。对这些不同视角下的点云数据进行配准和拼接,完成点云数据的融合,可将不同视角的点云数据整合到统一的坐标系中。

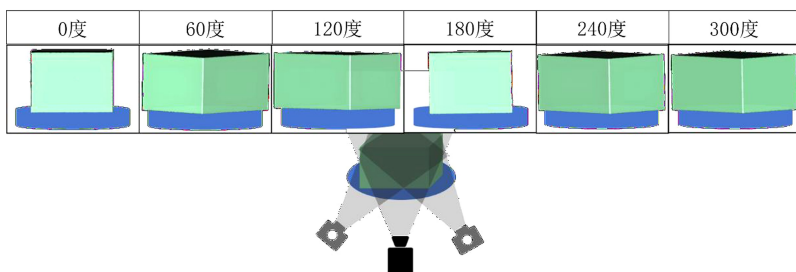


图2 多视角点云采集示意图

Fig.2 Multi-view point cloud acquisition schematic diagram

设转台的旋转角度为 θ ,以双目结构光相机的左相机坐标系 S 为基准生成点云数据。转台的初始坐标系为 R_1 ;旋转角度 θ 后,坐标系为 R_2 。

设物体点云数据在旋转前为 P_1 ,旋转后为 P_2 。则,坐标系 S 中 P_1 和 P_2 坐标分别为:

$${}^S P_1 = {}^S T_{R_1} R_1 P_1 \quad (1)$$

$${}^S P_2 = {}^S T_{R_2} R_2 P_2 \quad (2)$$

式中, $R_1 P_1$ 为在 R_1 坐标系下的点云数据, $R_2 P_2$ 为在 R_2 坐标系下的点云数据, ${}^S T_{R_1}$ 为从 R_1 坐标系

下转换到 S 坐标系下的旋转平移矩阵, ${}^S T_{R_2}$ 为从 R_2 坐标系下转换到 S 坐标系下的旋转平移矩阵。

由于 ${}^S T = {}^S T_{R_1} R_1 T$,其中, $R_1 T$ 为从 R_1 坐标系下转换到 R_2 坐标系下的旋转平移矩阵,故:

$${}^S P_2 = {}^S T_{R_1} R_1 T R_2 P_2 \quad (3)$$

由于 P_1 和 P_2 表示的是物体上的同一个对应点,因此 $R_1 P_1 = R_2 P_2$ 。结合式(1)和式(3),推导出:

$${}^S P_1 = {}^S T_{R_1} R_1 T R_2^{-1} R_1^{-1} T^{-1} P_2 \quad (4)$$

这表明,通过齐次变换矩阵,可以将点云 2 中

的点转换到点云 1 的坐标系中,实现两组点云的对齐。

各个视角点云数据之间的齐次变换矩阵 H 为:

$$H = \begin{matrix} S \\ R_1 \end{matrix} T \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} T^{-1} \begin{matrix} S \\ R_1 \end{matrix} T^{-1} \quad (5)$$

利用三维圆形标靶点云作为坐标转换的中介,追踪转台旋转前后标靶点云位置的变化,通过转台旋转角度与局部坐标系之间的对应关系,可求得齐次变换矩阵 H 。应用齐次变换矩阵 H 可将不同视角下的点云数据转换到统一的局部坐标系中,以完成各视角数据的配准与拼接。

如图 3 所示,将钕铁硼永磁体与标定板固定在转台上,通过转台旋转获取标定板在不同角度下的三维点云数据。旋转过程中,标定板的姿态变化信息可用于计算旋转与平移矩阵。由于永磁体与标定板固定在同一刚性系统中,因此标定板旋转所对应的旋转平移矩阵与永磁体实际旋转所经历的旋转平移矩阵一致。基于这一对应关系,可以利用标定板的旋转信息推算永磁体在各旋转角度下的位姿变化,从而实现点云数据在不同视角下的配准与拼接。在整个拼接过程中,仅需保持双目结构光相机与转台之间的相对位置不变,即可保证标定参数在坐标转换过程中的有效性。

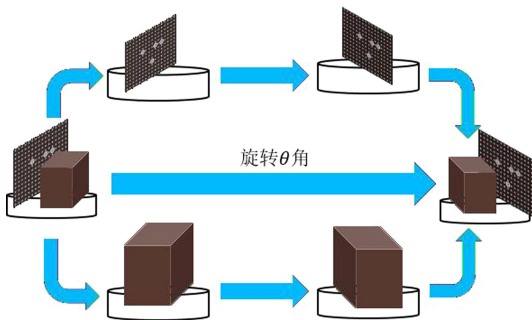


图 3 转台参数标定原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of turntable parameter calibration

2.2 基于标定块的双姿态点云配准

通过将物体固定于转台上旋转,并结合转台的标定参数,可以快速完成来自多视角的点云数据拼接,生成一个 2.5 D 点云模型。然而该点云数据存在顶部和底部特征信息的缺失。通过引入“双姿态”概念,即将钕铁硼永磁体以两种不同的摆放方式分别固定在转台上。对某一特定姿态,

通过转台的标定参数对多视角的点云数据进行拼接,生成对应的“姿态点云”。然后通过配准和融合两种不同姿态的点云数据,有效获得钕铁硼永磁体的大部分表面特征信息,补全缺失数据,从而实现完整的三维点云重建。

首先,通过标定块的标定,获取两种摆放姿态之间的旋转变换矩阵。由于两种姿态下的钕铁硼永磁体存在 90° 翻转关系,因此需要将标定块在转台上以 90° 翻转,分别采集两种姿态下的标定块点云数据,并计算对应的旋转变换矩阵。随后,选取两种姿态下标定块点云中的特征信息,通常包括 3 个或更多的特征点,应用 CloudCompare 软件进行配准,推导出两种姿态下点云之间的旋转和平移关系,确定姿态点云之间的相对变换矩阵。根据所得的旋转和平移矩阵,对两种姿态下的钕铁硼永磁体点云数据进行配准与融合,补充顶部和底部区域的点云信息,生成完整的三维点云数据。标定流程如图 4 所示。

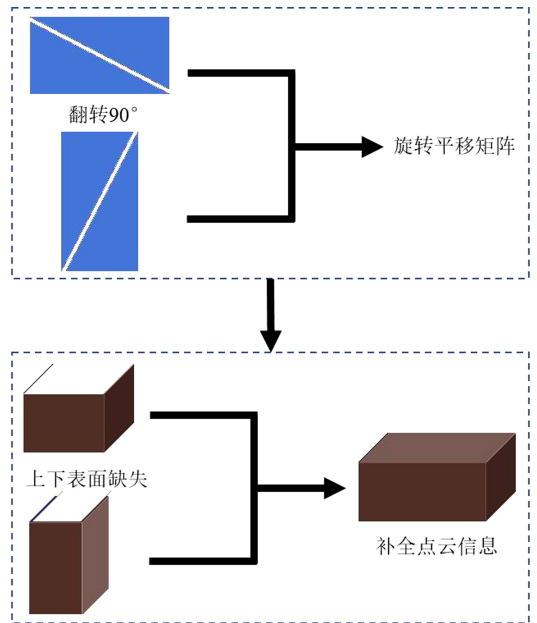


图 4 标定块参数标定流程

Fig.4 Calibration block parameter calibration process

3 实验与结果及分析

如图 5 所示,搭建基于双目结构光的点云拼接实验装置。两台分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素的 MV-CU013-A0UC 型工业相机和一台分辨率为 $1\ 280 \times 720$ 像素的 DLP3010EVM-LC 型投影设备组成双目结构光相机,实现结构光投影与数据采集。

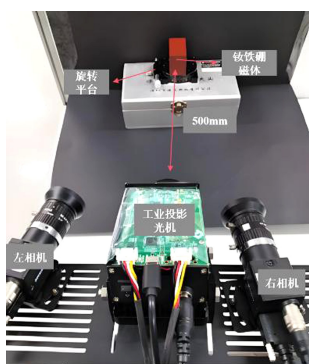


图 5 双目结构光点云拼接实验装置

Fig.5 Binocular structured light point cloud stitching setup

在采集点云数据之前,使用圆心间距为 6 mm 的圆形标记的玻璃制标靶对双目结构光相机进行标定。为确保数据采集的准确性,旋转平台放置在双目结构光相机的统一视场内。点云数据的采

集需在旋转平台调整至设定角度并稳定后进行。双目结构光相机采集旋转平台旋转不同角度时对应的点云数据,应用标定与配准步骤得到的转台参数对多视角点云数据进行拼接。

3.1 转台参数标定

转台以 60° 为步进角度顺时针旋转,共计 6 次旋转完成钕铁硼永磁体在单一姿态下的点云数据采集,转台参数的标定过程如图 6 所示。图 6 (a)和图 6 (b)为由双目结构光相机采集的标定工具在转台旋转前后所获得的场景点云数据。图 6 (c)和图 6 (d)为对采集的场景点云进行直通滤波和统计分析滤波,去除背景及噪声干扰的点云数据。图 6 (e)和图 6 (f)为选取 4 个圆心作为特征点进行初步配准,将旋转前、后的滤波点云对齐至同一坐标系。

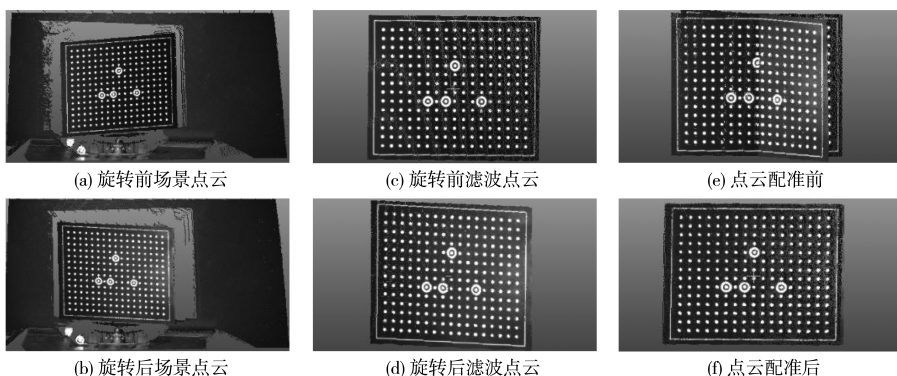


图 6 转台参数标定

Fig.6 Calibration of rotary table parameters

通过初步配准计算出粗配准矩阵,而后采用 ICP 算法对点云精细配准,得到精配准矩阵,将粗配准矩阵与精配准矩阵相乘,得出标定矩阵,该矩阵可用于描述旋转前后点云之间的变换关系。

使用 CloudCompare 软件对点云数据进行处理。使用辅助标定工具,记录配准参数。旋转前滤波点云数量为 53 209 点,旋转后滤波点云数量为 59 768 点。粗配准的 RMS (root mean square, 均方根误差) 为 0.25,精配准的 RMS 为 0.39。

3.2 钕铁硼永磁体点云模型建立

钕铁硼永磁体的双姿态视图如图 7 所示。通过标定块标定钕铁硼永磁体两种姿态间的坐标转换关系,以获取其姿态转换的旋转和平移参数。实验中将钕铁硼永磁体置于不同姿态,并利用标定块获取两种姿态下的点云数据进行配准操作。

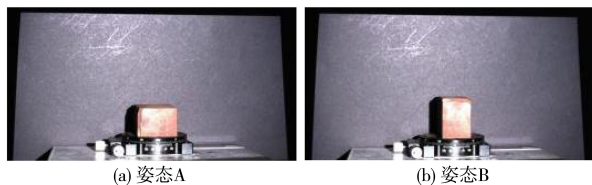


图 7 钕铁硼永磁体双姿态视图

Fig.7 Dual-pose view of NdFeB permanent magnets

在单一视角下,由双目结构光相机采集的场景点云往往包含大量背景噪声,需要进行数据预处理。通过直通滤波和统计分析滤波,从原始场景点云中提取出钕铁硼永磁体的纯净点云数据,有效去除背景和噪声干扰。而后基于转台参数标定所得的旋转和平移矩阵,对一组钕铁硼永磁体点云进行多视角拼接,将其余 5 个视角下的点云数据依次拼接至第一视角下的点云。最后,通过

多视角点云的拼接,获得钕铁硼永磁体的姿态点云模型 A,如图 8 所示,全面展示了拼接后点云模

型的几何特征和空间完整性。

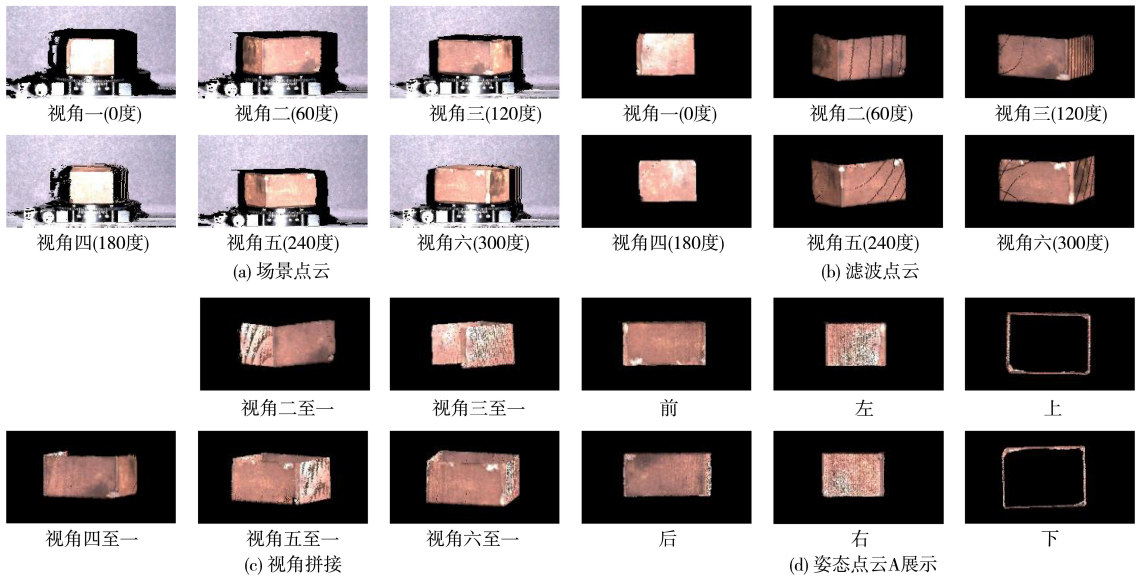


图 8 钕铁硼永磁体姿态 A 下多视角点云拼接

Fig.8 Multi-view point cloud stitching under NdFeB permanent magnet pose A

由图 7 和图 8 可见,姿态点云 A 和姿态点云 B 由于各自的摆放姿态限制,分别存在顶部区域和底部区域的点云信息缺失现象。为了弥补这一不足,利用标定块配准过程所获取的坐标转换矩阵,对姿态点云 A 和姿态点云 B 进行配准和融合,最终生成一个钕铁硼永磁体完整三维点云模型。

首先,将标定块放置为与钕铁硼永磁体的姿态 A 一致的摆放方式,利用双目结构光相机采集其点云数据。对采集到的点云数据预处理,通过

直通滤波和统计分析滤波等方法提取有效的标定块点云信息。随后,将标定块的摆放姿态调整为与钕铁硼永磁体的姿态 B 一致,并再次使用双目结构光相机采集其点云数据。通过相同的预处理过程,获取姿态 B 下有效的标定块点云数据。最后,将两种不同姿态下的标定块点云数据进行粗配准和精配准,得到钕铁硼永磁体姿态 A 和状态 B 两者之间的旋转变换关系。标定过程如图 9 所示。

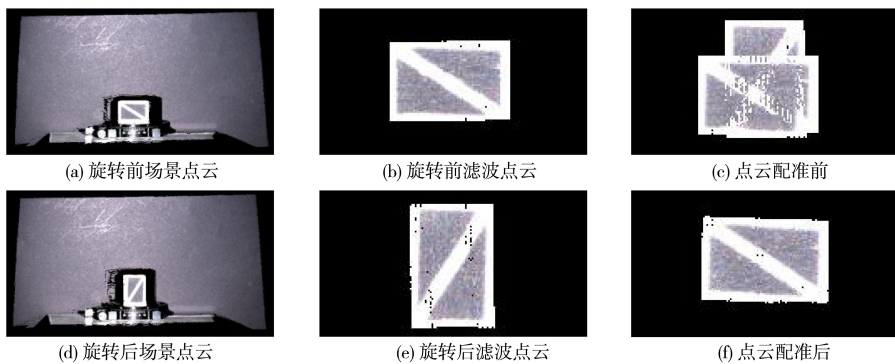


图 9 标定块参数标定

Fig.9 Calibration block parameter calibration

基于标定块参数标定获得的双姿态点云旋转平移矩阵,对姿态 A 和姿态 B 下的钕铁硼永磁体点云数据进行精确配准与融合。如图 10 所示,由

于摆放姿态限制而导致缺失的顶部和底部点云信息通过配准得到了有效补充。通过双姿态配准,不仅整合了多视角点云数据,而且完整重建了钕

铁硼永磁体的三维几何结构。

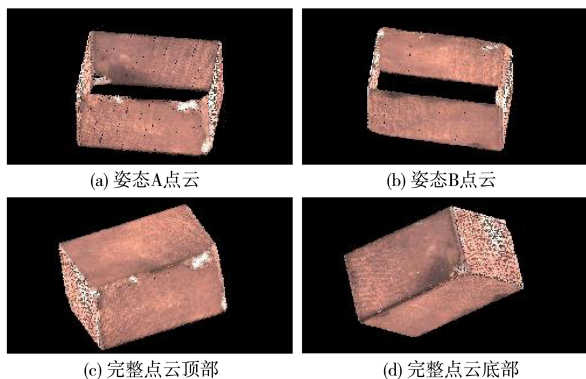


图 10 完整钕铁硼永磁体点云

Fig.10 Complete NdFeB permanent magnet point cloud

图 11(a)为钕铁硼永磁体的实物图和对应的点云拼接图,可对比分析表面缺陷的还原情况。可以发现,经多视角拼接生成的点云拼接图中缺陷的形态和位置与实物图中缺角和凹陷的形态和

位置基本对应。根据图 11(b)与图 11(c)所示的测量数据,可以得到点云图的局部缺陷的缺角最大长度为 24.91 mm,最大宽度为 4.09 mm,凹陷的最大长度为14.56 mm,最大深度为 2.98 mm。

3.3 实验结果精度评价

对钕铁硼永磁体点云拼接配准结果进行精度评估。使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺对钕铁硼永磁体实物的长、宽、高进行五次重复测量,取其平均值作为该物体的真实尺寸参考值。应用 CloudCompare 软件分析拼接配准完成后的钕铁硼永磁体点云模型,分别计算点云模型的长、宽、高尺寸。对比分析点云模型的测量结果与游标卡尺测得的真值,计算出两者之间的尺寸误差。测量结果及误差分析如表 1 所示。由表 1 的数据可看出,多视角双姿态点云重建方法所生成的钕铁硼永磁体完整点云模型的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.15 mm。

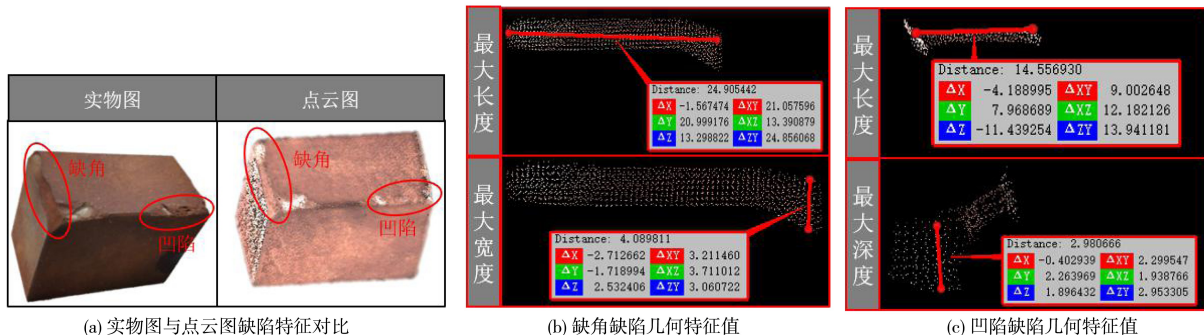


图 11 钕铁硼永磁体实物图与点云图缺陷特征对比

Fig.11 Comparison of defect features of NdFeB permanent magnet physical diagram and point cloud diagram

表 1 钕铁硼永磁体点云拼接精度

Tab.1 NdFeB permanent magnet point cloud stitching accuracy

实验次数	长宽高真值/mm	长宽高测量值/mm	绝对平均误差/mm	均方根误差/mm
1		48.85/25.40/35.60	-0.08	
2		48.42/26.08/34.88	-0.24	
3	48.84/25.94/35.32	48.84/25.99/35.28	0.01	0.15
4		48.72/25.88/35.38	-0.12	
5		48.61/26.50/35.50	0.17	

表 2 为不同算法配准速度和精度对比。由表 2 可知,多视角双姿态点云重建方法在配准时间和配准精度上相较于 SAC-IA+ICP 算法、4PCS+

ICP 算法、Super-4PCS+ICP 算法均有所优化。以传统算法与多视角双姿态点云重建方法的差值与传统算法的比值计算改进率。相对于 SAC-IA+

ICP 算法,配准时间缩短 83.6%,配准精度提高 87.6%;相对于 4PCS+ICP 算法,配准时间缩短 81.6%,配准精度提高 82.9%;相对于 Super-4PCS+ICP 算法,配准时间缩短 45.2%,配准精度提高 74.6%。综合 4 种算法结果,多视角双姿态点云重建方法在配准时间和 RMSE 精度指标上均表现出较优数值。

表 2 不同算法配准速度和精度对比

Tab.2 Comparison of registration speed and progress of different algorithms

算法类型	配准时间/s	RMSE/mm
SAC-IA+ICP	140	1.21
4PCS+ICP	125	0.88
Super-4PCS+ICP	42	0.59
多视角双姿态点云重建方法	23	0.15

参考文献:

- [1] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14: 239-256.
- [2] HOU Y L, SU X Y, CHEN W J. Alignment method of an axis based on camera calibration in a rotating optical measurement system[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6962.
- [3] YANG B, WANG Z T, XU Y T, et al. An SVD-based turntable calibration method with multiple reference planes segmented from point clouds[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(1): 015002.
- [4] SONG L M, LIU Z N, LI Y P, et al. Rotation axis calibration of a 3D scanning system based on dual-turntable angle cancellation[J]. Applied Optics, 2023, 62(4): 894-903.
- [5] WEI K H, LIU S, CHEN Q G, et al. Fast multi-view 3D reconstruction of seedlings based on automatic viewpoint planning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108708.
- [6] LUO H, ZHANG K, YANG N, et al. A robust method for multi-view 3D data stitching based on pasted marked points[J]. Measurement, 2024, 228: 114364.
- [7] 莫彩利, 王立忠, 任茂栋, 等. 小尺寸零件的无标志点扫描测量方法[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 409-422.
- [8] 秦琴, 汪光宇, 屠子美, 等. 一种利用旋转台运动的点云多视拼接方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(9): 50-57.

(责任编辑: 马晓磊)

4 结论

1) 提出了一种基于转台标定与标定块配准的多视角双姿态点云重建方法,通过转台旋转配准与双姿态数据融合,有效补全了钕铁硼永磁体点云在顶部和底部区域的缺失。实验结果表明,单一姿态下表面覆盖率为 67%,经过双姿态融合后表面覆盖率提升至 95%以上。

2) 针对生成的完整三维点云模型,使用游标卡尺测量的结果与点云测量的结果进行比对,整体尺寸均方根误差 RMSE 为 0.15 mm。与传统配准算法对比,多视角双姿态点云重建方法在配准时间和精度方面均具有明显优势,能够实现较高精度、较高效率的钕铁硼永磁体三维建模。