DOI: 10.3901/JME.2020.13.179

核主泵复杂零件机器人在位自动光学检测系统开发*

李文龙¹ 李中伟² 毛金城^{1,3} 王刚¹

- (1. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074;
2. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 武汉 430074;
3. 武汉工程大学机电工程学院 武汉 430205)

摘要: 采用机器人在位光学检测系统实现法兰密封型面误差检测与表面缺陷识别是解决核电现场人工检修可靠性差、存在核辐射伤害等问题的有效途径,但如何在狭小空间生成无干涉碰撞扫描测量路径、实现多次测量数据融合与型面误差计算是目前面临的主要难题。为此设计了具有6自由度运动功能的机器人在位自动光学检测系统,单幅测量范围200 mm×160 mm~800 mm×640 mm、测量景深400~800 mm、机器人工作半径1 200 mm,研究了测量系统手-眼标定矩阵计算与扫描位姿优化方法,并根据法兰密封型面完整测量需求生成扫描工位与机器人运动路径,提出面向法兰密封型面特定结构的测量数据融合与型面误差计算方法,开发出具备机器人测量路径控制、大规模测量点云预处理、三维匹配与色谱显示、型面误差计算与技术报告输出等功能的RobotScan软件。按照德国VDI/VDE标准对机器人检测系统精度进行了验证,单球直径、双球球心距的最大偏差小于0.025 mm、平均偏差小于0.02 mm,可满足核主泵复杂零件在位自动光学检测应用需求。

关键词: 核主泵复杂零件; 机器人光学检测; 扫描位姿优化; 测量数据融合; RobotScan 软件

中图分类号: TP29

The Development of Onsite-Automatic-Optical Inspection System with Robot for Complex Parts of Nuclear Main Pump

LI Wenlong¹ LI Zhongwei² MAO Jincheng^{1,3} WANG Gang¹

- (1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;
2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;
3. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205)

Abstract: It is effective method to deal with the problem of poor reliability and potential nuclear radiation from artificial maintenance, by using robot onsite-optical inspection system to calculate Flange seal profile error and identify surface detection. However, how to generate scanning path without interference, perform multiple measuring data fusion and calculate the profile error are the main challenges. This paper designs a robot onsite-automatic-optical inspection system with 6 degrees of freedom motion, which has 200 mm×160 mm ~800 mm×640 mm measuring range, 400~800 mm measuring depth and 1 200 mm motion radius. The method of hand-eye calibration matrix calculation and scanning pose optimization is investigated, and the required scanning station as well as robot motion path is generated according to a global measuring requirement of the Flange seal profile. Following that, the method of the measuring data fusion and profile error calculation for Flange profile structure is proposed, and a RobotScan software is developed with the functional of robot measuring path control, point cloud pre-processing, 3D matching with chromatography display, profile error calculation and inspection report output. Finally, the accuracy of robot inspection system is tested according to the German VDI/VDE standard, the maximum deviations and absolute deviations of

* 国家自然科学基金(51535004, 91648111)、湖北省杰出青年基金(2017CFA045)和中央高校基本科研业务费(2019kfjXKJC046)资助项目。
20190912 收到初稿, 20200119 收到修改稿

single-sphere diameter/double-ball center distance are within 0.025 mm and 0.02 mm respectively, which can meet the onsite-automatic-optical inspection requirement of complex parts of nuclear main pump.

Key words: complex part of nuclear main pump; robot optical inspection; scanning pose optimization; measuring data fusion; robot scan software

0 前言

核主泵位于核岛心脏部位,用于将反应堆芯核裂变热能传递给蒸汽发生器产生蒸汽,推动汽轮机发电,是核岛内唯一连续高速旋转的装备,其设计制造技术主要依赖进口^[1]。核主泵是核电站的一级设备,要求具备绝对的可靠性,其在役性能对保证核电站安全运行至关重要。目前大型压水堆主泵主要是轴承泵,其中法兰面、叶轮、泵轴、轴承等易出现常规性机械损伤,对核主泵复杂零件(法兰密封型面、闭式叶轮叶片、泵轴、轴承等)定期检修是核电站运维的重要工作之一^[2]。

下面以法兰密封型面为例介绍现场检修现状及存在的主要问题。法兰密封型面是核主泵及其它核电压力容器主设备的承压边界,主要失效形式表现为:①服役过程中受机械应力和热应力影响可能产生尺寸变形和形状变形;②核环境重水腐蚀和拆装过程机械损伤可能导致出现剥落、凹点、划痕等表面缺陷。由于核主泵法兰密封型面无法拆卸并搬运到室内进行检测,因此必须在核电站现场进行在位检测。如图1所示,目前主要采用卡尺、塞规等人工方式检测尺寸和形状误差,采用肉眼观测方式识别表面缺陷。受检修现场空间狭小、卡尺和塞规很难摆放、密封面内外环大范围难以测量等因素影响,现有人工操作方式检测效率低、检测可靠性相对较差。更为严重的是,长时间的现场操作,潜在的核辐射对人体健康存在严重危害。

针对以法兰密封型面为代表的核主泵复杂零件现场检修需求及人工操作存在的弊端,课题组拟开发机器人在位自动光学检测系统,采用非接触扫描仪获取大规模测量点云数据,以机械手代替人手提升现场检测可靠性,以面阵扫描仪代替人眼提升尺寸/形位误差计算精度和表面缺陷识别精度。开展该项研究面临的主要技术难题:①核电站检修现场空间狭小,机器人需通过多个立柱和固定支架倒挂在法兰密封型面上,如何综合考虑扫描仪最佳测量景深和测量角度、扫描仪与机器人-立柱无碰撞,完成三维面阵扫描位姿优化与机器人测量路径生成是本研究亟需解决的难题之一;②法兰密封型面外径可达1.5~2.0 m,扫描仪需要多次多角度测量才能获得完整的点云数据,如何实现多次测量数据高精度融合,同时完成大规模测量点云匹配、型面误差计

算与缺陷识别是必须解决的另一难题。

(a) 人工操作方式

(b) 表面划痕缺陷

图1 核主泵法兰密封型面人工检修现场

近年来,国内外学者围绕激光扫描位姿优化、测量系统误差建模、无碰撞路径生成等开展了研究。杨聚庆等^[3]提出一种基于最小二乘优化的激光扫描测量位姿与机器人末端位姿标定方法,齐立哲等^[4]研究了机器人测量位姿标定误差对三维激光扫描精度与工件定位精度的影响,李繁和臧朝平等^[5]研究了航空叶片类零件激光扫描路径生成与三维变形测试方法;林晶等^[6]研究了机器人三维激光扫描系统中 T-Scan 扫描仪位姿与测量误差的影响规律,发现扫描随机误差远小于系统误差,系统测量误差与扫描景深、扫描仪俯仰角呈双线性关系;郝继贵等^[7]提出采用定向相机和固定靶标实现近景摄影测量初始位姿估计,并结合光束平差优化算法解算出被测点的精确三维坐标,该方法无需设置标记点,可自由选择相机姿态。WANG 等^[8]研究了一种用于管道零件三维扫描路径生成方法;XU 等^[9]研究了以机器

人为载体的结构光三维测量系统, 扫描测量时考虑了相机和线光源的可视性、相机分辨率、测量视场大小、相机分辨率和最大景深等影响因素; REINHART 和 TEKOUO^[10]提出一种机器人扫描测量无碰撞路径生成方法, 用于产品质量检测和现场装配, 生成扫描路径时考虑了扫描仪垂直投影、扫描测量最大视场、测量景深范围、扫描仪与工件无碰撞等约束条件; LARSSON 和 KJELLANDER^[11]研究了以机器人为载体进行尺寸/形状激光扫描测量的路径生成方法, 可实现扫描仪沿空间曲线连续运动, 已应用于汽车复杂零件轮廓测量、特征提取与曲面建模。上述研究中待测工件放置在空旷无障碍环境下, 进行扫描位姿优化与机器人测量路径生成时, 可选择范围较大。本项研究中机器人通过多根立柱倒挂在法兰密封型面上方, 激光扫描位姿、机器人运动范围被极大地约束在有限范围内, 在保证扫描仪与机器人-立柱-法兰面不发生碰撞的情况下, 如何实现扫描仪以最佳或较佳姿态完成多视角连续测量仍是一件极富挑战性的科研任务。

核主泵法兰密封型面多次扫描后必须解决多视角测量数据拼接融合、层叠/密度不均点云重采样、含噪音点云光顺等问题, 保证测量数据的完整性和精确性, 才能应用于后续型面误差计算与表面缺陷识别。孟飙等^[12]针对移动扫描获取的多视角测量数据, 采用激光跟踪仪完成局部扫描位姿的动态跟踪, 采用全局测量控制网实现多次测量数据的融合; 陈允全等^[13]构建由工业机器人和激光跟踪仪组成的自动化扫描测量系统, 用于大型飞机蒙皮装配过程对缝间隙与对缝阶差的定量评估, 其中采用 Leica AT901-MR 跟踪定位功能实现机器人不同测量姿态的数据拼接; 张德海等^[14]开发出近景摄影测量装置及其处理软件, 可计算工件表面粘贴的编码点和非编码点, 并利用系统产生的全局标定点完成多视角测量数据融合; 蔡勇等^[15]研究了多传感器测量布置方法, 提出采用大分辨率相机覆盖靶标的方法实现测量数据的全局拼接, 试验中数据拼接最大误差不超过 0.1 mm; 程筱胜等^[16]采用重叠区域的两片相似点云进行预拼接, 以此计算的变换参数作为初值, 应用改进的迭代算法(Iterative closest point, ICP)完成多视角测量数据融合。PARK 等^[17]研究了便携式手动扫描测量的多视角数据拼接问题, 采用点到曲面距离最小化方式实现多视角测点粗拼接, 再采用特征点匹配对准的方式完成多视角测点精拼接; LEI 等^[18]采用曲面局部特征值和法矢信息作为标识物实现邻域匹配种子点搜索, 该方法可用于解决重叠区域小、含非均匀测点的多视角拼接问题;

AL-NUAIMI 等^[19]研究了建筑物室内多视角测点连续拼接问题, 采用主成分分析计算旋转变换参数, 采用测点重心坐标差值计算平移变换; BUSTOS 等^[20]研究了测量溢出点准确识别与剔除方法, 这种预处理方式可提高两幅视图测点拼接精度, 同时可提升大规模测点数据拼接效率。孙殿柱等^[21]采用 R-tree 数据结构和点云曲率信息实现密度不均点云数据精简, 张学昌等^[22]采用非均匀热传导理论建立点云高斯噪声光顺数学模型, 郑惠江等^[23]定义三角网格测点到目标曲面的投影距离评价测点简化误差; 杨角龙等^[24]研究了线扫描点云分块、蒙皮测点去噪、特征点提取与排序等预处理方法, 在此基础上完成相邻蒙皮边界特征与修配余量计算; 本文作者^[25]针对测点存在密度不均、测点不完整、层叠时现有匹配方法存在的不足, 提出基于方差最小化原理的三维匹配方法, 可抑制现场固有测量缺陷对曲面匹配误差的影响。LI 等^[26]采用 k 邻域的信息熵识别密度差异性, 以此定义曲面光顺因子和特征保持因子, 在保留高区率特征的基础上实现平坦区域的自适应光顺; MANDOW 等^[27]应用球面二次重采样和匹配最近点策略解决初始数据规模较大的问题, 该方法考虑了扫描仪多次测量时的位姿序列, 相比现有的随机采样和均匀采样具有更好的重采样效果; CHEN 等^[28]定义了一个平移/旋转/比例变换不变量, 可用于密度不均/层叠测点去噪与精简, 在大规模测点显示、高精度匹配与曲面建模中进行了测试; POPOV 等^[29]研究发现型面检测时激光扫描存在随机误差与系统误差, 其中随机误差(剔除溢出点)遵循高斯分布, 系统误差与扫描分辨率、扫描景深有关; DING 等^[30]采用自适应距离函数作为度量指标, 提出一种基于 M 估计的测点定位与曲面检测方法, 并通过在线测量与叶片型面误差评估进行了验证。法兰密封型面整体尺寸大, 需要从不同视角完成 10 次以上机器人扫描才能获得完整数据, 上述研究大多是基于两幅图像重叠区域执行拼接操作, 直接应用于本项目多次测量数据(法兰面首尾依次测量)融合时可能存在较大的误差累积问题, 此外现有研究缺乏面向法兰密封型面的轮廓误差计算与表面缺陷识别方法。

针对上述两大技术难题, 本项目介绍一种机器人在位自动光学检测系统, 具体包括: ① 综合考虑法兰型面结构、最佳测量景深和测量角度约束, 研究手(机械手)-眼(面阵扫描仪)参数标定与扫描位姿优化方法, 生成现场无干涉碰撞的机器人测量路径; ② 应用机器人重复定位精度高的特点, 研究多视角测量数据融合、法兰型面误差计算与表面缺陷识别方法; ③ 搭建机器人在位光学检测系统, 具有 6 个自由度, 适应于直径 1 700 mm 以下法兰密封型面检测, 并通过单球/双球

检测精度测试、RobotScan 软件模块操作测试、表面缺陷测试验证了该平台测量精度与操作可行性。

1 机器人在位光学检测系统设计

机器人在位光学检测系统如图2所示,主要由扫描仪、机器人、支撑立柱等组成。考虑现场测量时操作空间狭小,机器人倒置安装在法兰密封型面上方,工作人员通过远端工作站进行测量操作与监控。扫描仪采用课题组自主开发的PowerScan 双目面阵高精度扫描仪,摄像头分辨率500万像素,测点间距 $0.077\sim 0.309\text{ mm}$,单幅测量范围 $200\text{ mm}\times 160\text{ mm}\sim 800\text{ mm}\times 640\text{ mm}$,测量景深 $400\sim 800\text{ mm}$,单幅测量精度优于 $\pm 0.015\text{ mm}$;机器人采用ABB IRB1600型机器人,有6个自由度,工作范围 $1\,200\text{ mm}$,有效载荷 10 kg ,质量 250 kg ,支持倒置安装;支撑立柱3根,底部基座安装在主螺栓孔内,主螺栓孔18个,沿圆周方向均布。

图2 机器人在位检测系统设计示意图

核主泵法兰密封型面待测区域直径设计为 $1\,500\sim 1\,700\text{ mm}$,待测区域宽度设计为 100 mm 。为保证检测系统可覆盖完整待测区域,机器人运动范围不小于 850 mm ,采用的ABB IRB1600机器人工作半径 $1\,200\text{ mm}$,满足待测区域直径 $1\,500\sim 1\,700\text{ mm}$ 的设计要求。进行多视角测量时,采用高精度标记点实现多次测量数据的拼接,因此面阵扫描仪单次测量时需同时测量到密封型面和标记点,面阵扫描仪最佳景深处对应的测量范围 $416.8\text{ mm}\times 333.3\text{ mm}$,满足待测区域宽度 100 mm 的设计要求。

2 三维面阵扫描空间位姿优化

2.1 手-眼标定矩阵计算

实现面阵扫描仪与机器人操作系统集成首先需

要完成手(机械手)-眼(扫描仪)标定。如图3所示, $\{B\}$ 为机器人基坐标系, $\{E\}$ 为机器人末端坐标系, $\{S\}$ 为扫描仪测量坐标系, $\{W\}$ 为工件坐标系,机器人手-眼标定的目的是建立坐标系 $\{S\}$ 到坐标系 $\{E\}$ 的刚体变换矩阵 ${}^E_S T$ 。

图3 手-眼标定示意图

操作机器人从不同位姿对标准球进行扫描测量,假定标准球球心在 $\{B\}$ 中表示为 ${}^B p$,第 j 次扫描后球心拟合位置在 $\{S\}$ 中表示为 ${}^S p_j$,则

$${}^B p = {}^B T_j {}^E T {}^S p_j \quad (1)$$

式中, ${}^B T_j$ 为第 j 次扫描时由机器人内部关节参数决定的末端坐标系到基坐标系的变换矩阵,可由机器人操作系统直接计算, ${}^E T$ 表示扫描过程中参数不变的手-眼标定矩阵。多次扫描测量标准球,并拟合球心位置得到如下坐标变换方程

$$\begin{aligned} {}^B p &= {}^B T_1 {}^E T {}^S p_1 \\ {}^B p &= {}^B T_2 {}^E T {}^S p_2 \\ &\vdots \\ {}^B p &= {}^B T_j {}^E T {}^S p_j \\ &\vdots \\ {}^B p &= {}^B T_n {}^E T {}^S p_n \end{aligned} \quad (2)$$

可见式(2)是一个有关手-眼标定矩阵 ${}^E T$ 和球心位置 ${}^B p$ 的方程组,经推导 $n \geq 3$ 才能解析计算出矩阵 ${}^E T$ 。根据式(2)右边各项相等得

$${}^B T_j {}^E T {}^S p_j = {}^B T_{j+1} {}^E T {}^S p_{j+1} \quad (3)$$

上式左右两边分别乘以 $({}^B T_{j+1})^{-1}$, $({}^S p_j)^{-1}$ 得

$$({}^B T_{j+1})^{-1} {}^B T_j {}^E T = {}^E T {}^S p_{j+1} ({}^S p_j)^{-1} \quad (4)$$

令 $X = {}^E T$, $A_j = ({}^B T_{j+1})^{-1} {}^B T_j$, $B_j = {}^S p_{j+1} ({}^S p_j)^{-1}$,

则

$$A_j X = X B_j, j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

当机器人在不同姿态多次扫描标准球后,可得如(5)所示多个等式,进而采用文献[31]方法计算矩

阵 X 的旋转变换矩阵和平移矢量。

2.2 工具坐标系建立与位姿优化

完成手-眼标定矩阵 E_sT 求解后, 可将扫描仪与机器人作为一个整体看待, 用于后续工件初始定位和精确测量时扫描位姿优化。考虑扫描仪与待测工件处于最佳测量景深时, 测点精度相对较高, 故将工具坐标系 $\{T\}$ 置于最佳测量景深 500 mm 处。如图 4 所示, 将扫描仪 TCP (Tool Center Point) 设置在扫描仪镜头中心沿镜头外法线 500 mm 处, 工具坐标系 z 轴方向与镜头外法线方向一致, 设计固定扫描仪的工装时, 使得工具坐标系 $\{T\}$ 相对末端坐标系 $\{E\}$ 绕 y 轴旋转 90° 。考虑测量景深约束 (相当于沿坐标系 $\{E\}$ 的 x 轴移动 500 mm), 以及扫描仪自身几何参数约束 (扫描仪镜头中心位于坐标系 $\{E\}$ 的位置矢量为 $p=[115.7 \ 1.5 \ 119]^T$ mm), 可得 $\{T\}$ 相对 $\{E\}$ 的刚体变换矩阵

图 4 扫描仪工具坐标系 $\{T\}$

$${}^E_sT = \begin{bmatrix} R(y, 90^\circ) & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 615.7 \\ 0 & 1 & 0 & 1.5 \\ -1 & 0 & 0 & 119 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

求得 E_sT 后, 即可将考虑扫描仪最佳测量景深的编程位置设定在工具坐标系 $\{T\}$ 的原点处。

下面采用建立的工具坐标系优化核主泵法兰密封面内外环测量时的扫描仪位姿。考虑法兰密封型面待测区域直径设计为 1 500~1 700 mm, 待测区域宽度设计为 100 mm, 为保证获得完整测量数据, 扫描仪单幅测量范围应大于 100 mm。如图 5a 所示, AB 、 CD 、 DE 、 EF 段测量对扫描仪空间位姿要求不高, 下面重点针对密封面侧壁 CC' 、 BB' 测量讨论扫描仪空间位姿优化。扫描仪进行内环测量时, 首先将两相机中心的连线方向与核主泵法兰密封型面的半径方向 (即 $B'C'$ 方向) 垂直, 这样既能保证零件被测部位位于扫描仪两相机公共视区, 又能减少扫描次数; 其次将已建立的工具坐标系 $\{T\}$ 的原点放置在 $B'C'$ 中点 O' 处, 保证扫描仪扫描时处于最佳测量景深 500 mm 处; 最后调整扫描仪与水平面的倾斜角度 α , 通过仿真试验与现场测试可以发现当 α 过大时, 扫描仪易与周边环境发生干涉, 当 α 过小时, 扫描仪无法获取被测部位 CC' 段的完整点云。最终通过 RobotStudio 仿真与测试试验可以得到面阵扫描仪进行内环测量时的较优倾斜角度 $\alpha = 70^\circ$, 同理可得如图 5b 所示扫描仪进行外环 BB' 段测量时的较优倾斜角度 $\beta = 60^\circ$ 。

(a) 内环 CC' 段测量, 优化角度 α

(b) 外环 BB' 段测量, 优化角度 β

图 5 扫描仪位姿优化

3 机器人测量无碰撞路径生成

3.1 扫描工位规划

确定扫描仪内外环扫描位姿后,需根据扫描仪单幅测量范围($416.8\text{ mm}\times 333.3\text{ mm}$)、法兰密封型面待测区域直径($1\ 500\sim 1\ 700\text{ mm}$)规划扫描仪测量次数以及对应工位。如图6a所示,为实现内环完整测量,相邻两次测量时要保证有足够的重叠区域,本项目扫描法兰面时设定重叠比例不少于15%。根

据上述约束条件,通过计算分析,内环共需14个扫描工位。如图6b所示,同理可得外环完整测量共需18个扫描工位,去除与支撑立柱发生碰撞干涉的3个工位(线框),增加6个过渡点扫描工位(将在第3.2节介绍),实际扫描工位为21个。现场试验表明,在规划得到的35个扫描工位中,多次扫描得到的点云数据可以通过视图中的重合标记点完成自动拼接(具体步骤见第4.1节),从而实现对核主泵法兰密封型面全方位扫描测量。

图6 内外环扫描工位计算

3.2 碰撞干涉分析

本文的机器人在位光学检测系统存在内、外部两种碰撞情况,其中内部碰撞主要是指扫描仪与机器人之间存在碰撞。如图7a所示,经过仿真计算分析,扫描仪与机器人4轴的碰撞可通过约束机器人5轴的工

作范围 $-110^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 来避免;如图7b所示,扫描仪与机器人1轴/底座的碰撞可通过创建一个高为660 mm、底面直径为350 mm的圆柱体约束区域来避免。

如图8所示,外部碰撞主要是指扫描仪与支撑立

图7 扫描仪与机器人内部碰撞分析

(a) 扫描仪与立柱碰撞

(b) 插入过渡点

图8 扫描仪与外部立柱碰撞分析

柱之间存在碰撞, 为此在连续扫描路径上, 通过在立柱附近插入过渡点来避免发生碰撞。

3.3 测量路径生成

完成扫描工位规划与碰撞干涉分析后, 需进一步生成机器人可连续执行的内环、外环扫描测量路径, 其中机器人沿内环、外环路径运动的第一个工位和最后一个工位由工装确定。如图 9 所示, 为了安全起见, 设置一个原点(序号为 0)作为机器人运动的起始点和终止点。每次扫描测量之前, 机器人带动扫描仪从原点开始运动, 当扫描任务完成后, 机器人带动扫描仪回到原点处。如图 9a 所示, 机器人带动扫描仪扫描内环时, 不会发生碰撞干涉, 采用计算得到的 14 个内环扫描工位, 在 RobotStudio 中自动生成内环测量路径, 其中序号 1 为起始点, 序号 14 为终止点。如图 9b 所示, 机器人带动扫描仪扫描外环时, 在自动生成的环形测量中路径插入 6 个过渡点工位(2_2、3_2、7_2、8_2、12_2、13_2), 代替三个碰撞点工位(2-3 间、7-8 间、12-13 间), 其中实心点(序号为 1)为起始点, 空心点(序号为 15)为终止点。

图 9 法兰密封型面测量路径生成

4 测量数据融合与型面误差评估

4.1 标记点精确定位与数据融合

如图 10 所示, m_i 表示粘附在密封面内侧的标记点, p_j 表示第 $k(k=1,2,\dots,35)$ 次测量时获得的点云数据, $\{S_k\}$ 表示第 k 次测量时扫描仪坐标系, $\{G\}$ 表示标记点所在全局坐标系。第 3.1 节计算的扫描工位可保证完整扫描法兰型面, 当相邻两次测量数据有不少于 3 个共有标记点时可通过这些标记点计算拼接变换矩阵, 但试验中发现直接采用共有标记点进行拼接融合时存在较大的累计误差, 下面介绍一种利用机器人重复定位精度高的特点进行多视角测量数据融合与型面误差计算的方法。

图 10 多视角测量数据融合示意图

- (1) 采用摄像测量的方法, 精确测量所有标志点 M 在全局坐标系 $\{G\}$ 的位置。
- (2) 将机器人运动到第 1 次扫描工位 S_1 , 测量当前工位下的标志点 M_1 , 满足 $M_1 \subseteq M$ 。
- (3) 根据点集 M_1 、点集 M , 应用方差最小化匹配[25]或 ADF 匹配[26], 计算当前扫描工位 S_1 到全局坐标系 $\{G\}$ 的刚体变换矩阵 ${}^G_{S_1}T$ 。
- (4) 同理可得第 k 次扫描工位对应的刚体变换矩阵 ${}^G_{S_k}T, k=2,3,\dots,31$ 。
- (5) 将机器人运动到第 1 次测量工位 S_1 , 完成当前工位下工件的扫描测量任务。
- (6) 通过以下公式, 将第 1 次测量得到的点云数据 P_1 表示在全局坐标系 $\{G\}$

$${}^G P_1 = {}^G_{S_1} T {}^{S_1} P_1 \quad (7)$$

- (7) 同理, 将机器人运动到第 k 次测量工位, 完成扫描测量任务, 通过以下公式, 将第 k 次测量点云数据 P_k 统一表示在全局坐标系 $\{G\}$

$${}^G P_k = {}^G_{S_k} T {}^{S_k} P_k \quad (8)$$

最终可得到 35 次测量数据融合点集, 注意输入第 3.1 节计算得到的扫描工位对应的机器人

关节参数,控制机器人到所有扫描工位完成扫描测量任务,后续融合过程不存在相邻测量数据融合累计误差问题,法兰密封型面整体测量精度主要受摄影测量标志点测量误差和面阵扫描仪测量误差影响。图 11 所示为某法兰密封型面测量数据融合结果,可见采用上述机器人扫描测量与数据融合方法,可将多次测量数据统一到同一坐标系下完整表示。

(a) 测量数据融合前

(b) 测量数据融合后

图 11 部分法兰密封型面数据融合结果

4.2 型面误差计算与缺陷识别

核主泵法兰密封型面定期检修的主要任务是计算尺寸/形位误差、识别表面缺陷。如图 12 所示为某型号法兰密封型面检测参数,主要包括深度参数和直径参数,以原点位置 1 为起点,逆时针每间隔 45° 检测一个位置,共计 8 个位置,具体计算 H_1 、 H_2 、 H_3 、 D_1 、 D_2 、 D_3 实际值与设计值的尺寸误差,以及 H_1 、 H_2 、 H_3 对应的平面度和 D_1 、 D_2 、 D_3 对应的圆度。形位误差计算主要参考国家标准 GB/T 1182—2008《GB/T 1182—2008 产品几何技术规范(GPS)几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注》、GB/T 11337—2004《平面度误差检测》以及 GB/T 7235—2004《产品几何量技术规范(GPS)评定圆度误差的方法半径变化量测量》。

图 12 某型号法兰密封型面检测参数

考虑光学扫描测量方法易受环境影响,测得的点云数据局部可能存在粗大噪音点和浮动点,影响平面度误差或圆度误差评估,在计算平面度和圆度时需剔除数据中偏差较大的粗大噪音点和浮动点。对于平面度计算,将所选点云数据按最小二乘原则拟合平面,并沿该平面法线上下移动,将包容所有测点的最小平面间距定义为平面度误差。对于圆度计算,由于空间圆的参数方程定义复杂,难以直接进行最小二乘拟合,故将所选测点投影到平面上,并按最小二乘原则拟合圆,根据包容原则得到最大最小圆,其半径之差即为圆度误差。

核环境下受重水腐蚀或机械损伤导致的表面缺陷通常位于法兰平面的下方,现场检修时需识别缺陷位置、分布形态和最大深度等。完成测点-设计模型匹配操作后,分别计算测点 p_j 到设计模型的有向距离 d_j ,若矢量 d_j 方向与法兰平面法矢一致,则测点 p_j 位于缺陷区域,可用蓝色表示缺陷区域测点,用于识别缺陷位置和分布形态,其中 $\|d_j\|$ 值越大蓝色越深。缺陷最大深度定义为

$$h = \max \{\|d_1\|, \|d_2\|, \dots, \|d_n\|\} \quad (9)$$

5 机器人测量与型面检测试验

5.1 检测系统精度验证

核主泵法兰密封型面机器人在位光学检测系统如图 13 所示,主要包括机器人、扫描仪、扫描测量与数据处理软件、法兰件、控制柜等。扫描仪 PowerScan-Super 由课题组自主开发,摄像头分辨率 500 万像素,测量景深 400~800 mm,单幅测量精度优于 ± 0.015 mm,测量过程可与 ABB 机器人运动参数实时通讯;扫描测量与数据处理软件 RobotScan 由课题组自主开发,主要包括机器人测量路径控制模块、点云预处理模块、三维匹配与色谱显示模块、型面误差计算与报告输出模块等。

(a) 1/4样件测量

(b) 样件整体测量

图 13 法兰密封型面机器人检测系统

参考德国 VDI/VDE 2 364 标准, 对标准球进行测量数据融合与拼接试验, 评定机器人检测系统精度。

(1) 单球精度验证: 将单球放置在现场可测范围, 移动机器人使扫描仪从如图 14a 所示 5 个不同位姿进行测量, 完成多角度测量数据拼接, 形成完整的标准单球点云模型, 计算单球直径与名义值的差值, 将单球放置在沿环形密封面均布的 5 个位置, 重复 5 次试验, 分别计算各个位置的直径偏差, 并计算偏差均值。

(2) 双球精度验证: 将双球放置在现场可测范围, 移动机器人使扫描仪从如图 14b 所示 7 个位姿进行测量, 通过测量数据融合形成完整的标准双球

点云模型, 计算双球球心距与名义值的差值, 将双球放置在沿环形密封面均布的 5 个位置, 重复 5 次试验, 分别计算各个位置的直径偏差, 并计算偏差均值。表 1、2 测试结果中, 标准单球直径偏差、标准双球球心距偏差最大值小于 0.025 mm, 平均值小于 0.02 mm。

图 14 标准单/双球精度验证示意图

表 1 标准单球直径检测验证(mm)

序号	测量值	名义值	绝对误差	平均误差
1	63.498 8	63.514 1	0.015 3	0.013 5
2	63.506 6		0.007 5	
3	63.496 6		0.017 5	
4	63.501 5		0.012 6	
5	63.499 6		0.014 5	

表 2 标准双球球心距检测验证(mm)

序号	测量值	名义值	绝对误差	平均误差
1	149.983 4	150.007 0	0.023 6	0.017 0
2	149.996 8		0.010 2	
3	150.023 6		0.016 6	
4	149.994 4		0.012 6	
5	150.028 9		0.021 9	

5.2 软件模块操作测试

5.2.1 机器人测量路径控制模块

如图 15 所示, 机器人测量路径控制模块 RobotCtrl 是基于 ABB 机器人 PC SDK 编写的上位机软件, 主要包括 RAPID 程序操作模块、自动测量模块、机器人位姿显示模块、设置机器人六轴角度模块、点动模块、偏置模块、IO 模块以及机器人事件信息模块。RAPID 程序操作模块用于连接机器人控制器、设置运动速度、启动 RAPID 程序、停止 RAPID 程序与复位 RAPID 程序; 自动测量模块用于调用第 3.3 节生成的测量路径, 控制机器人完成自动扫描任务; 机器人位姿显示模块用于实时显示机器人当前的运动状态; 设置六轴角度模块用于控制机器人各关节角度, 可以选择加减角度, 单次角度变化范围有 $1^\circ/3^\circ/5^\circ/10^\circ/20^\circ$ 供用户选择使用,

每个轴均可单独操作;点动、偏置模块用于连接机器人控制器后读取路径点,可设置机器人运动到指定点;IO模块用于提供24V的电压信号,开启表示电压为24V,关闭表示电压为0;机器人事件信息模块用于显示控制器发生的事件信息,包括启动程序、停止程序、复位程序、遇到转角故障等。

图15 RobotCtrl 模块操作界面

5.2.2 测量点云预处理模块

执行节3生成的机器人测量路径,可获得内外环35组共计1500万点云数据,将其导入RobotScan中,并应用节4测量数据融合方法得到如图16a所示

(a) 原始点云

(b) 精简/去噪后点云

图16 法兰密封面测量点云与预处理操作

示完整点云。可见直接测得的点云规模庞大、包含较多粗大噪音点和浮动点,必须执行点云精简与去噪操作。RobotScan点云预处理模块提供按比例均匀精简和等间距精简两种方式,本文采用按比例均匀精简方式,采样后保留点云比例5%,最终将点云规模控制在75万,执行大规模点云精简和去噪处理后的数据如图16b所示。

5.2.3 三维匹配与色谱显示模块

如图17a所示,采用课题组提出的方差最小化匹配方法计算实际测点到设计模型离散点的刚体变换参数,完成测点到模型的最佳匹配拟合,并计算测点到模型对应最近点的有向距离,生成图17b三维色谱图。三维色谱图直观地显示出不同区域测点与设计模型的偏差,经计算正向和负向平均偏差绝对值均小于0.15mm。

(a) 匹配前

(b) 匹配后

图17 三维匹配计算与色谱显示

5.2.4 型面误差计算与报告输出模块

上述模块以三维色谱图的形式定性显示法兰密封型面整体变形情况,下面介绍图12所示法兰密封型面参数的尺寸/形位误差计算方法。以设计模型为基准,按图12所示8个截面截取实际测点,根据实际测点计算参数H1、H2、H3、D1、D2、D3,取其平均值与设计值做比较,获得H1-H3、D1-D3对应的尺寸误差,H1-H3对应的平面度误差,以及D1-D3对应的圆度误差,检测报告如表3所示。在表3中按技术要求可进一步添加制表人、制表时间、任务编号、产品型号等属性信息。

表 3 法兰样件型面参数检测结果(mm)

序号	H1	H2	H3	D1	D2	D3
1	13.012 3	15.960 7	12.963 2	1 480.743 2	1 556.551 0	1 607.794 9
2	12.988 7	15.989 5	13.002 2	1 480.754 5	1 556.739 1	1 607.827 3
3	12.880 4	15.963 4	12.955 8	1 480.654 6	1 556.451 3	1 607.759 0
4	12.993 1	16.003 0	13.019 4	1 480.611 5	1 556.480 2	1 607.746 9
5	12.939 7	15.927 0	13.002 3	—	—	—
6	12.971 9	15.973 8	12.983 7	—	—	—
7	12.974 1	15.932 5	12.944 4	—	—	—
8	12.966 1	15.915 0	12.911 6	—	—	—
平均值	12.965 8	15.958 1	12.972 8	1 480.691 0	1 556.555 4	1 607.782 0
设计值	13	$16^{+0.2}_0$	13	$1480.5^{+0.3}_{-0.3}$	$1557^{+0.5}_0$	$1608^{+0.2}_0$
偏差	0.034 2	0.041 9	0.027 2	-0.191 0	0.444 6	0.218 0

5.3 表面缺陷识别测试

如图 18a 所示为在铝合金表面加工的正方形、圆形和三角形缺陷, 缺陷深度 0.5 mm、1 mm, 正方形边长 20 mm、圆直径 20 mm、三角形边 20 mm。完成测点与模型匹配操作后, 计算测点到设计模型有向距离并生成 3D 色谱图, 图 18c 所示为直接得到的色谱图, 图 18d 为去除粗大噪音和浮动点后的色谱图, 最大深度分别为 20.02 mm、20.03 mm 和 20.02 mm。测试工件的平面区域与缺陷区域颜色不一, 正方形、圆形、三角形的缺陷位置和分布形态显示清楚, 且 1 mm 缺陷对应的颜色相比 0.5 mm 缺陷对应的颜色更深。

图 18 表面缺陷识别测试结果

6 结论

(1) 设计了 6 自由度机器人自动光学检测系统, 单幅测量范围 200 mm×160 mm~800 mm×640 mm、

测量景深 400~800 mm、测点间距 0.077~0.309 mm、测量机器人工作半径 1 200 mm, 可用于直径 1 700 mm 以内核主泵法兰密封型面在位光学检测。

(2) 以最佳测量景深、可测倾斜角度、覆盖法兰型面为主要约束条件, 研究了机器人检测系统手-眼参数标定与扫描位姿优化方法, 生成操作现场无干涉碰撞的机器人自动测量路径。

(3) 应用摄影测量定位精确与机器人重复定位精度高的特点, 研究了多视角测量数据融合、型面误差计算与表面缺陷识别方法, 并通过单/双标准球和法兰型面样件检测试验进行了验证。

以高柔性机械手代替人手、以高精度扫描仪代替人眼实现核主泵复杂零件在位检测, 是解决现场检修存在核辐射、手工检测型面误差准确度低、肉眼识别表面缺陷可靠性差等问题的有效途径, 目前亟需开发法兰/泵壳/热屏密封型面、叶轮型面、泵轴型面等易损件的专用检测数据库, 以实现在位扫描测量、数据处理与误差评估。

参 考 文 献

- [1] 雷明凯. 核主泵制造的基础理论问题研究进展[J]. 中国核电, 2018, 11(1): 51-58.
LEI Mingkai. Fundamental theory on manufacture of main coolant pump in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2018, 11(1): 51-58.
- [2] 乔彦龙, 梁军, 王兆希, 等. AP1000 屏蔽式主泵维修可行性分析[J]. 核科学与技术, 2014, 2(3): 40-44.
QIAO Yanlong, LIANG Jun, WANG Zhaoxi, et al. A feasibility study of repairing the AP1000 reactor coolant pump[J]. Nuclear Science and Technology, 2014, 2(3): 40-44.
- [3] 杨聚庆, 王大勇, 董登峰, 等. 激光测量标定机器人坐标系位姿变换的正交化解算[J]. 光学精密工程, 2018,

- 26(8): 1985-1993.
- YANG Juqing, WANG Dayong, DONG Dengfeng, et al. Laser measurement based evaluation for orthogonal transformation calibration of robot pose[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1985-1993.
- [4] 齐立哲, 汤青, 牟超, 等. 机器人三维激光扫描视觉系统标定误差[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 9-15.
- QI Lizhe, TANG Qing, MOU Chao, et al. Calibration error of robotic vision system of 3D laser scanner[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 9-15.
- [5] 李繁, 臧朝平. 曲面叶片三维工件变形连续扫描激光测试[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2991-2998.
- LI Fan, ZANG Chaoping. Curved blade three-dimensional operational deflection shape continuous scanning laser measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2991-2998.
- [6] 林晶, 李泷杲, 黄翔, 等. 基于 T-Scan 的三维激光扫描系统测量误差分析[J]. 航空制造技术, 2019, 62(6): 95-100.
- LIN Jing, LI Shuanggao, HUANG Xiang, et al. Analysis of detecting error of laser scanning system based on T-Scan[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(6): 95-100.
- [7] 郝继贵, 郭磊, 林佳睿, 等. 大型空间复杂曲面无干扰精密测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3524-3529.
- ZHU Jigui, GUO Lei, LIN Jiarui, et al. Non-intrusive precise measuring method of large complex surface[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3524-3529.
- [8] WANG X Y, LUO Y H, WANG J, et al. Scanning path planning for laser bending of straight tube into coil-shape tube[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4): 909-17.
- [9] XU Jing, XI Ning, ZHANG Chi, et al. A robot-assisted back-imaging measurement system for transparent glass[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 779-788.
- [10] REINHART G, TEKOUO W. Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 25-28.
- [11] LARSON S, KJELLANDER J A P. Path planning for laser scanning with an industrial robot[J]. Robotics and Autonomous System, 2008, 56(7): 615-624.
- [12] 孟飙, 曲学军. 大尺寸复杂形状组合测量系统的全局标定与多视数据融合[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 2051-2060.
- MENG Biao, QU Xuejun. Global calibration and multi-view data fusion for combination measurement system of large complicate shapes[J]. Acta Automatic Sinica, 2017, 43(11): 2051-2060.
- [13] 陈允全, 李泷杲, 黄翔, 等. 基于机器人的飞机大型结构三维自动化检测方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 51-57.
- CHEN Yunquan, LI Shuanggao, HUANG Xiang, et al. Three-dimensional automatic detection method for large-scale structure of aircraft based on robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 51-57.
- [14] 张德海, 梁晋, 唐正宗, 等. 基于近景摄影测量和三维光学测量的大幅面测量新方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(7): 817-822.
- ZHANG Dehai, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. New measuring method of large size measurement based on close range photogrammetry and 3D optical measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(7): 817-822.
- [15] 蔡勇, 秦现生, 张雪峰, 等. 多摄像机视觉检测大范围布置方法及其数据拼接[J]. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1984-1987.
- CAI Yong, QIN Xiansheng, ZHANG Xuefeng, et al. Multi-camera layout design on large scope visual inspection and its data registration[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(16): 1984-1987.
- [16] 程筱胜, 崔海华, 廖文和, 等. 面向自由视角的多片三维扫描数据无约束拼接算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(7): 823-827.
- CHENG Xiaosheng, CUI Haihua, LIAO Wenhe, et al. Unconstrained registration algorithm for multiple view 3D scanned data[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(7): 823-827.
- [17] PARK S Y, BAEK J, MOON J Y. Hand-held 3D scanning based on coarse and fine registration of multiple range images[J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22(3): 563-579.
- [18] LEI Huan, JIANG Guang, QUAN Long. Fast descriptors and correspondence propagation for robust global point cloud registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(8): 3614-3623.
- [19] AL-NUAIMI A, HILSENBECK S, GARCEA A, et al. 6DOF decoupled roto-translation alignment of large-scale indoor point clouds[J]. Computer Vision and Image

- Understanding, 2017, 157: 72-8.
- [20] BUSTOS A P, CHIN T J. Guaranteed outlier removal for point cloud registration with correspondences[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(12): 2868-2882.
- [21] 孙殿柱, 朱昌志, 范志先, 等. 基于型面特征的三维乱点云精简算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(23): 2840-2843.
- SUN Dianzhu, ZHU Changzhi, FAN Zhixian, et al. Reduction algorithm for scattered points based on model surface analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(23): 2840-2843.
- [22] 张学昌, 习俊通, 严隽琪. 基于非均匀热传导理论的点云数据平滑处理[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 115-118.
- ZHANG Xuechang, XI Juntong, YAN Junqi. Point cloud data smoothing processing based on nonuniform heat conduction theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 115-118.
- [23] 郑惠江, 何改云, 丁伯慧. 离散数据环境下复杂曲面检测点布局策略研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 8-14.
- ZHENG Huijiang, HE Gaiyun, DING Bohui. Research on sampling points distribution strategy for complex curved surfaces in dispersed data environment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 8-14.
- [24] 杨角龙, 黄翔, 李泷杲, 等. 基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 73-77.
- YANG Jiaolong, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Method for extracting repair amount of skin seam based on scan line point cloud[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 73-77.
- [25] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 基于方差最小化原理的三维匹配数学建模与误差分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 190-198.
- LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. Mathematical modeling and error analysis of 3D matching based on variance minimization principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 190-198.
- [26] LI W L, XIE H, ZHANG G, et al. Adaptive bilateral smoothing for a point-sampled blade surface[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(6): 2805-2816.
- [27] MANDOW Anthony, MARTINEZ, J L, REINA AJ, et al. Fast range-independent spherical subsampling of 3D laser scanner points and data reduction performance evaluation for scene registration[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(11): 1239-1250.
- [28] CHEN S, TIAN D, FENG C, et al. Fast resampling of three-dimensional point clouds via graphs[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(3): 666-681.
- [29] POPOV I, ONUH S, DOTCHEV K. Dimensional error analysis in point cloud-based inspection using a non-contact method for data acquisition[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(7): 075303(8pp.).
- [30] DING J, LIU Q, SUN P. A robust registration algorithm of point clouds based on adaptive distance function for surface inspection[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(7): 075003(13 pp.).
- [31] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.
- [32] LI W L, YIN Z P, HUANG Y A, et al. Three dimensional point-based registration algorithm based on adaptive distance function[J]. IET Computer Vision, 2011, 5(1): 68-76.

作者简介: 李文龙(通信作者), 男, 1980 出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂零件精密测量、机器人加工。

E-mail: wlli@mail.hust.edu.cn

李中伟, 男, 1980 出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为三维测量、机器视觉。

E-mail: zwli@mail.hust.edu.cn

毛金城, 男, 1982 出生, 博士后, 副教授。主要研究方向为机器人精密操作。

E-mail: nb_ftsj@163.com

王刚, 男, 1992 出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人测量-加工一体化技术。

E-mail: 651676101@qq.com