

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514800

接触式测量机器人弹性测针工具坐标系标定方法^{*}

于长志,张连新,陈东生

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621999)

摘 要:面向大部件装配位姿的跨尺度高精度、特征通用性好、多测针协同测量需求,以六轴协作机器人为运动载体、以弹性测针为测量传感器等构建了接触式测量机器人,具有可编程自动化、作业范围广、重复测量精度高、产品适应性强等特点。现有机器人工具坐标系标定方法多假设为刚体,导致难以获得准确的弹性测针工具坐标系,也无法统一多测针间的关系。针对上述问题,提出了基于标准球的接触式测量机器人弹性测针工具坐标系标定方法,首先,推导分析了弹性测针工具坐标系标定原理及误差分析;其次,提出了基于标准球的多弹性测针工具坐标系迭代标定方法,分别建立了测针直径校准方法、主弹性测针工具坐标系迭代标定方法、星型弹性测针工具坐标系相对迭代标定方法,获得了多弹性测针的工具坐标系,实现了多测针协作测量;最后,进行了测量实验。通过实验显示,接触式测量机器人的测针直径校准精度优于 0.007 mm、测针工具坐标系标定精度优于 0.016 mm,单点重复测量精度优于 0.016 mm、空间测量精度优于 0.030 mm,产品位置测量精度优于 0.050 mm、姿态测量精度优于 0.010°,在自动化装配、特征测量等方面具有广泛的工程应用潜力。

关键词:接触式测量机器人;多测针协同;工具坐标系;测量精度;弹性测针

中图分类号: TP391.41 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Calibration method of tool coordinate systems of elastic styluses for contact-type measuring robot

Yu Changzhi, Zhang Lianxin, Chen Dongsheng

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Considering the requirements of high-precision cross-scale, good feature universality, and collaborative measurement with multi-styluses for assembly pose of large components, a contact-type measuring robot was constructed, which used six-axis collaborative robot as motion carrier and elastic styluses as measuring sensors. It features programmable automation, wide operating range, high repeatability in measurement accuracy, and strong product adaptability. Most existing calibration methods of robot tool coordinate system assume the tool to be a rigid body, which makes it difficult to accurately calibrate the tool coordinate system for elastic styluses and fails to unify the relationships among multiple styluses. To address these issues, the calibration method of elastic styluses tool coordinate systems for contact-type measuring robot based on standard sphere was proposed. Firstly, the calibration principle and error analysis of elastic stylus tool coordinate system were derived. Secondly, the iterative calibration methods of multiple elastic styluses tool coordinate systems based on standard sphere were proposed. The calibration methods of stylus diameters, main elastic stylus tool coordinate system, and star-shaped elastic styluses tool coordinate systems were established, respectively. This allowed for the acquisition of tool coordinate systems of multi-styluses and the realization of collaborative measurement between multi-styluses. Finally, measurement experiments were conducted. The results demonstrate that the contact-type six-axis measuring robot system achieved the stylus diameter calibration accuracy of better than 0.007 mm, the tool coordinate system calibration accuracy of better than 0.016 mm, the single-point repeatability measurement accuracy of better than 0.016 mm, the spatial measurement accuracy of better than 0.030 mm. Experiments also show that the product's position measurement accuracy is better than 0.050 mm, and attitude measurement accuracy is better than 0.010°. These results demonstrate that the contact-type measuring robot possesses significant potential for a wide range of engineering applications, such

收稿日期: 2025-12-22 Received Date: 2025-12-22

^{*} 基金项目: 特殊环境数字制造装备技术创新中心开放基金项目 (KF2025-03-03) 资助

as automated assembly and feature measurement.

Keywords: contact-type measuring robot; collaborative measurement with multi-styluses; tool coordinate system; measuring accuracy; elastic stylus

0 引言

装配位姿参数测量是产品装配的重要环节,对装配质量、产品可靠性有着重要影响^[1-2]。在航空航天精密对接装配^[3-4]、自动化装配^[5-7]等领域,装配位姿参数如中心位置相对偏差、姿态相对偏差、周向角度相对偏差等的测量精度,直接影响到产品装配的成功与否、装配效率等。尤其是在大部件自动化装配^[8-10]中的产品存在尺寸跨度大、异构多型、材质多样等特点,对测量手段提出了工作范围广、测量精度高、材质适应强、测量方式通用的挑战性要求。传统机器视觉测量手段^[5]具有环境光照适应性较弱、需借助运动机构进行大尺寸大范围空间测量、跨尺度测量精度较低、分辨率随视场增大而显著下降等问题;激光跟踪仪测量手段^[8],存在需粘贴标记且易被遮挡、成本高昂等问题。鉴于六轴协作机器人具有重复定位精度高、工作范围大,以及测针相对产品特征具有高适应性等特点,以六轴协作机器人为运动载体、以弹性测针为传感器,辅以测杆工装等,构建了接触式六轴测量机器人。在装配作业中,由于需要不同测针进行协作特征测量^[11],因此需要获取不同测针球心相对机器人末端坐标系的位姿关系,即工具坐标系(tool coordinate system, TCS)。

现有的机器人工具坐标系标定方法主要包括多点标定法^[12-13]、激光基准法^[14-17]、视觉基准法^[18-19]、标准球基准法^[20-21]等。周星等^[12]定量分析了标定点数和标定位姿对机器人工具中心点(tool center point, TCP)标定精度的影响,提出了一种改进的五点选优 TCP 标定算法,工具坐标系的标定精度提高到 0.88 mm。宋安玉等^[13]针对机器人工具坐标系标定时标定精度不高、效率较低的问题,使用线结构光传感器扫描标准试块以补偿机器人工具-末端坐标系位姿关系,获得的工具坐标系位置偏差可达 ± 0.25 mm。Li 等^[14]结合线激光、旋转台和二维视觉传感器,研究开发了一种基于新型激光辅助的工具中心点标定方法,标定时间从 30 min 以上缩短至 6 min 以内,最大标定误差降低到 0.30 mm。储昭碧等^[15]为提高机器人手眼标定精度,借助激光跟踪仪,提出了基于深度网络和圆轮廓拟合算法的手眼标定方法,标定误差优于 0.5 mm。温秀兰等^[16]为提高机器人末端的定位精度,采用激光跟踪仪对机器人进行几何参数标定,获得了准确的机器人运动学参数,使机器人末端定位精度提高到 0.541 mm。Michael 等^[17]采用被动式三坐标测量臂和激光跟踪仪实时测量并反馈机器人的工具坐标系,将工具

中心点的定位精度提高到了 0.13 mm。毛成林等^[18]采用高精度彩色深度相机方式,提出了机器人工具中心点标定方法,同时标定 TCP 和手眼关系以减少误差累积,标定精度可达 0.2 mm。Petri 等^[19]针对传统的基于刚体的建模与控制方法在 TCP 定位精确度不高问题,提出了一种基于视觉引导的用于重型长臂机械臂的工具中心点标定方法,但标定精度较低、仅为 ± 5 mm,适用于大工作范围但精度要求较低的场景。Wu 等^[20]针对提高机器人手眼标定问题,在机器人末端中心安装标准球,依次通过 3D 结构光相机捕获标准球点云、使用迭代权重最小二乘拟合球面算法拟合球体,手眼标定精度可达 0.03 mm,该方法可用于刚体工具中心标定、无法适用于弹性测针 TCP 标定。徐建明等^[21]提出一种基于可浮动标准球体和双目视觉引导的机器人 TCP 标定方法,从多个不同姿态接触球体表面,并双目视觉识别球心坐标,通过目标优化获得 TCP 参数,最小误差可达 0.14 mm。上述研究多是以末端执行器为刚体形式进行的工具坐标系标定,而接触式测量机器人采用弹性测针进行测量,其末端执行器为弹性体;同时接触式测量机器人进行的是高精度装配位姿测量,需要测针工具坐标系提高到 0.02 mm。传统方法假设机器人末端为刚体,导致传统工具坐标系标定方法无法用于接触式测量机器人的弹性测针工具坐标系标定。

针对弹性测针工具坐标系标定及多弹性测针相对关系标定问题,对测针工具坐标系提出假设,其工具坐标系方向与机器人末端坐标系一致而仅有位移变化,在此基础上,提出了基于标准球的接触式测量机器人弹性测针工具坐标系标定方法。首先,介绍接触式测量机器人的组成,推导了基于标准球的弹性测针标定原理及误差分析;然后,提出了基于标准球的主弹性测针迭代标定方法、星型弹性测针相对迭代标定方法;最后,开展了接触式测量机器人的标定实验、精度实验,通过实验显示,接触式测量机器人测针直径校准精度优于 0.007 mm、测针工具坐标系标定精度优于 0.016 mm,单点重复测量精度优于 0.016 mm、空间测量精度优于 0.030 mm,实际位置测量精度优于 0.050 mm、姿态测量精度优于 0.010°。接触式测量机器人不仅可用于装配位姿参数测量,也可用于几何尺寸测量,具有跨尺度高精度测量、自动测量、产品适应性好、环境适应性优等特点。

1 接触式六轴测量机器人系统组成

接触式六轴测量机器人系统,如图 1 所示。不同于

传统测量机器人^[22],接触式六轴测量机器人系统主要由六轴协作机器人及控制器、测杆工装、小应力接触式弹性测针等组成,具有测量范围空间大、运动空间灵活、适宜人机协作示教且不受材质、环境光照影响等特点,具有显著的通用性和适应性。

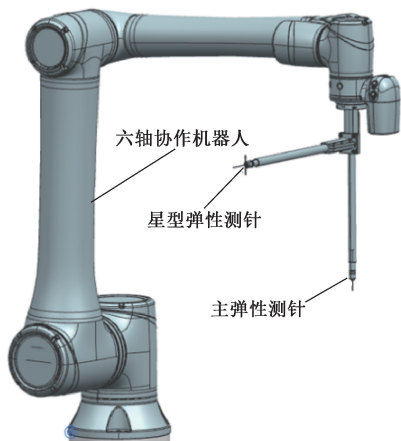


图1 接触式六轴测量机器人系统

Fig. 1 The system of contact-type six-axis measuring robot

如图1所示,六轴协作机器人的工作半径为 $\pm 1\,300\text{ mm}$ 、重复精度为 0.02 mm 、最大负载 10 kg 。为降低机器人末端负载,提高测量精度,测杆工装选择碳纤维材质。为提高产品特征的适应性,主弹性测针采用柱形测针、星型弹性测针采用柱形测针和球形测针两种,在实际应用中可根据产品待测特征进行选择。接触式测量机器人的测量原理为:1)对机器人进行空间网格精度标定,获得插补后的标定数据;2)当弹性测针的半球段接触到产品表面,并在达到或超过测针感应力后,测针会将力信号转换为电信号;电信号将触发机器人,从而获得机器人末端的瞬时坐标,并根据测针工具坐标系,得到机器人基坐标系下的测针测点初始坐标;3)根据机器人的重复精度,将该测点初始坐标与机器人空间网格标定数据进行映射,从而得到最终的测针测点坐标。可以看出,测针工具坐标系是接触式测量机器人能够实现测量功能、不同测针协作测量的关键基础。

2 基于标准球的弹性测针工具坐标系标定原理

针对传统机器人工具坐标系标定方法^[12]多以机器人末端执行器为刚体形式进行工具坐标系标定研究、难以适用于弹性测针工具坐标系标定问题,引入标准球以构建相对机器人基座标系不动的球体中心,推导了基于标准球的弹性测针工具坐标系标定原理,并分析了标定误差。

以主测针为例,将测针通过工装固定在测量机器人末端,以下为推导过程。设 ${}^B_E\mathbf{H}$ 、 ${}^E_t\mathbf{H}$ 、 ${}^t_o\mathbf{H}$ 和 ${}^B_o\mathbf{H}$ 分别表示测量机器人末端坐标系到基坐标系变换关系、测针工具坐标系到末端坐标系变换关系、不动物体(标定球)坐标系相对测针工具坐标系变换关系和不动物体(标定球)坐标系相对基坐标系变换关系。可得:

$${}^B_E\mathbf{H} \times {}^E_t\mathbf{H} \times {}^t_o\mathbf{H} = {}^B_o\mathbf{H} \quad (1)$$

设 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 分别表示齐次变换关系的旋转矩阵和平移矩阵,则对式(1)进行分解可得:

$$\begin{bmatrix} {}^B_E\mathbf{R} & {}^B_E\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^E_t\mathbf{R} & {}^E_t\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^t_o\mathbf{R} & {}^t_o\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B_o\mathbf{R} & {}^B_o\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对式(2)进行展开计算可得:

$$\begin{bmatrix} {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{T}_o\mathbf{R} & {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{R}_o\mathbf{T} + {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_E\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B_o\mathbf{R} & {}^B_o\mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (3)$$

从式(3)可得到的关系为:

$$\begin{cases} {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{R}_o\mathbf{R} = {}^B_o\mathbf{R} \\ {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{T}_o\mathbf{T} + {}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_E\mathbf{T} = {}^B_o\mathbf{T} \end{cases} \quad (4)$$

不妨设测针工具坐标系的方向与测量机器人末端方向一致而仅有位移偏差 ${}^E_t\mathbf{T}$ 、设标定球坐标系方向与测针工具坐标系方向一致,则 ${}^t_o\mathbf{R}$ 和 ${}^t_o\mathbf{R}$ 可表示单位向量。设测针在以不同机器人位姿测量球心坐标时,所得球心坐标与该位姿下测针工具坐标系原点坐标近似重合,即 ${}^t_o\mathbf{T} \approx \mathbf{0}$,则式(4)可写为:

$${}^B_E\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_E\mathbf{T} = {}^B_o\mathbf{T} \quad (5)$$

由于在标定过程中,不动物体(标定球)相对机器人基坐标系保持固定不变,即对于测量机器人以不同位姿 ${}^B_{Ei}\mathbf{H}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 标定时, ${}^B_o\mathbf{T}$ 恒等。可得式(6),即:

$$\begin{cases} {}^B_{E1}\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_{E1}\mathbf{T} = {}^B_{E2}\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_{E2}\mathbf{T} \\ \vdots \\ {}^B_{En-1}\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_{En-1}\mathbf{T} = {}^B_{En}\mathbf{R}^E\mathbf{T} + {}^B_{En}\mathbf{T} \end{cases} \quad (6)$$

变换可得:

$$\begin{bmatrix} {}^B_{E1}\mathbf{R} - {}^B_{E2}\mathbf{R} \\ {}^B_{E2}\mathbf{R} - {}^B_{E3}\mathbf{R} \\ \vdots \\ {}^B_{En-1}\mathbf{R} - {}^B_{En}\mathbf{R} \end{bmatrix} \times {}^E_t\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^B_{E2}\mathbf{T} - {}^B_{E1}\mathbf{T} \\ {}^B_{E3}\mathbf{T} - {}^B_{E2}\mathbf{T} \\ \vdots \\ {}^B_{En}\mathbf{T} - {}^B_{En-1}\mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{设 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^B_{E1}\mathbf{R} - {}^B_{E2}\mathbf{R} \\ {}^B_{E2}\mathbf{R} - {}^B_{E3}\mathbf{R} \\ \vdots \\ {}^B_{En-1}\mathbf{R} - {}^B_{En}\mathbf{R} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} {}^B_{E2}\mathbf{T} - {}^B_{E1}\mathbf{T} \\ {}^B_{E3}\mathbf{T} - {}^B_{E2}\mathbf{T} \\ \vdots \\ {}^B_{En}\mathbf{T} - {}^B_{En-1}\mathbf{T} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = {}^E_t\mathbf{T} \text{ 则}$$

式(7)可写为:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (8)$$

式中:矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩为 $3(n-1) \times 3$;矩阵 $\mathbf{B}$ 的秩为 $3(n-1) \times 1$;待解 $\mathbf{X}$ 的秩为 3×1 。由于测针工具坐标系的方向与末端坐标系同向,因此仅存在3个平移自由度未知

量,即需要 $n \geq 3$ 组测量机器人位姿。可采用最小二乘法求解上述超定方程组,使得残差 $r = \|B - AX\|_2$ 达到极小值,即令:

$$\frac{\partial [AX - B]^T [AX - B]}{\partial X} = 0 \quad (9)$$

式中: T 表示矩阵转置。则求解式(9)可得测针球心相对机器人末端坐标系的相对位移关系为:

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (10)$$

从而得到测针球心相对机器人末端的工具坐标系为:

$${}^{end}T_{stylus}(\Delta x, \Delta y, \Delta z, 0, 0, 0) \quad (11)$$

根据式(4)、(8)和(9)可以看出,测针标定误差主要来源于:人工对点误差,即测针在以不同位姿测量标准球测点坐标时,测针球心与标准球球心不重合引起的误差,此过程会产生较大随机误差; A 系数矩阵误差、 B 系数矩阵误差,主要是机器人运动参数建模误差以及机器人绝对精度误差。综上,设 (x^*, y^*, z^*) 为拟合球心坐标,则理论标定误差可描述为:

$$\begin{cases} Err = \bar{\lambda} + 3\sigma \\ \lambda_i = \sqrt{(x_i - x^*)^2 + (y_i - y^*)^2 + (z_i - z^*)^2} \\ \bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \\ \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 / (n - 1)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Err 表示标定误差; λ_i 表示到各测量点到拟合球心的距离; $\bar{\lambda}$ 表示所有测量点到拟合球心的平均距离; σ 为距离的标准偏差值。

3 基于标准球的多弹性测针工具坐标系迭代标定方法

在弹性测针标定原理推导过程中,其假设测针在以不同机器人位姿测量球心坐标时,所得球心坐标与该位姿下测针工具坐标系原点坐标近似重合,然而在实际进行测点获取时,属于人工目视对点。利用球形测针或柱形测针获取周向测点时,难以保证测针球赤道线和标准球赤道线进行接触测点;在标准球顶点测点时,也难以保证测针球心与标准球球心连线垂直标准球赤道面,这是引起标定误差的主要因素。另外,如图1所示,接触式测针通过测杆,分布在不同空间位置。在工程中往往需要不同测针进行协同作业,因此需要获取不同测针的相对关系,即进行多弹性测针相对关系标定,如图2所示为弹性测针工具坐标系标定示意图。

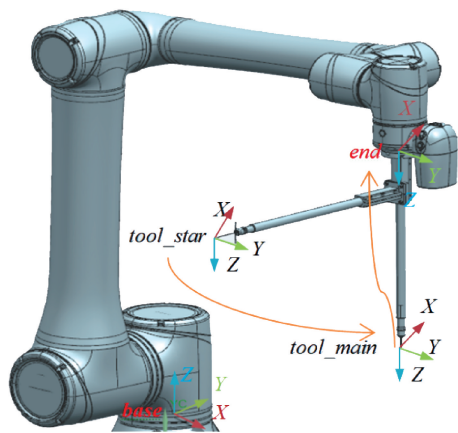


图2 弹性测针工具坐标系标定示意图

Fig. 2 Diagram of calibration of tool coordinate systems of elastic styluses

为实现多弹性测针标定,提出基于标准球的接触式测量机器人多弹性测针工具坐标系迭代标定方法,分别获得不同测针的校准直径和工具坐标系,其具体实现过程如后文描述。

3.1 基于标准球的测针直径校准方法

放置并固定已知直径的标准球,并在测针直径标定过程中,使标准球相对测量机器人底座固定不动。设标准球的标称直径为 D_0 ,测针的标称直径为 D_i ,对应测针的校准直径为 d_i , i 表示测针序号,其校准步骤为:

- 1) 让不同测针分别采集标准球的5个不同测点,即顶部1点和球周向均布4点。
- 2) 分别对5个测点采用最小二乘算法拟合空间球,从而获得球心坐标和拟合球直径 fd_i 。
- 3) 分别计算拟合球直径和实际球直径的直径残差可描述为:

$$\Delta d_i = fd_i - D_0 - d_i \quad (13)$$

设初始值 $d_i = D_i$ 。若 Δd 偏差小于阈值 0.01 mm,则结束标定;若 Δd_i 偏差大于阈值 0.01 mm,则继续下一步。

- 4) 计算并更新测针的校准直径,即:

$$d_i = d_i + \Delta d_i \quad (14)$$

式(14)作为新获得的测针标定直径,并重复步骤1)~3),直至满足设定阈值,从而得到每个测针的标定直径。

3.2 主弹性测针工具坐标系迭代标定方法

主弹性测针工具坐标系,即主测针工具坐标系相对六轴协作测量机器人末端坐标系下的旋转平移关系。对于六轴协作接触式测量机器人装置,主测针多采用球形测针或柱形测针,其测针末端均为球形。为便于标定,以主测针测头球心点为主测针工具坐标系中心点,且主测

针工具坐标系方向与六轴协作测量机器人的末端坐标系方向一致、仅产生空间位移,即可假设为 ${}^{\text{end}}\mathbf{R}_{\text{tool_main}} = {}^{\text{end}}\mathbf{R}_{\text{tool_main}} = {}^{\text{end}}\mathbf{R}_{\text{tool_main}} = \mathbf{0}$ 。则主弹性测针相对六轴协作测量机器人末端的工具坐标系为 ${}^{\text{end}}\mathbf{TCP}_{\text{tool_main}}({}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^x, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^y, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^z, 0, 0, 0)$, 设 ${}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^x, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^y, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^z$ 分别表示主弹性测针工具坐标系相对六轴协作测量机器人末端坐标系的偏移。主弹性测针工具坐标系有3个未知量,即相对末端中心的位置偏差,则主测针至少需以3种不同姿态获取标准球心点坐标。考虑到最小二乘拟合的鲁棒性、标定精度、标定效率等,选取4种不同姿态 ${}^{\text{base}}\mathbf{R}_{\text{end}}^i, i = 1, 2, 3, 4$, 则每种姿态下分别测标准球的5个点。需要注意的是,在以每种姿态获取标准球测点时,所用姿态需保持一致,即在用测针碰撞标准球时可选择位移 $X+/-, Y+/-, Z+/-$ 这6种移动方式。主测针的工具坐标系标定的具体步骤为:

1) 采用4种不同的机器人姿态,分别用主测针沿机器人末端工具坐标系方向获取标准球测点,可通过式(10)计算得到主测针初始工具坐标系;

2) 再次采用上述4种不同的机器人姿态,分别用主测针沿其工具坐标系获取标准球测点;

3) 对获得的标准球测点分别采用最小二乘算法拟合空间球,则可得到不同位姿下的球心坐标分别为 ${}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^i({}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^i, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^i, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^i), i = 1, 2, 3, 4$;

4) 计算不同位姿下主测针球心坐标的偏差为:

$$\begin{cases} {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^x = -({}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^1 - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^2)/2 \\ {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^y = -({}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^1 - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^2)/2 \\ {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^z = {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^3 - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^4 \end{cases} \quad (15)$$

5) 若上述所得球心坐标偏差均小于阈值0.02 mm, 则结束;若有大于参数阈值0.02 mm, 则更新主测针工具坐标系,见式(16),并重复步骤2)~5),直至满足阈值要求,从而得到主测针的工具坐标系。

$$\begin{cases} {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^x = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^x + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^x \\ {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^y = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^y + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^y \\ {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^z = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_main}}^z + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_main}}^z \end{cases} \quad (16)$$

3.3 星型弹性测针工具坐标系相对迭代标定方法

在使用接触式六轴协作测量机器人进行装配参数测量时,往往需要不同测针进行协同,即采用不同测针分别测量待测产品的不同特征进行装配参数计算。因此,各测针间的相对关系的准确性变得尤为重要。为此提出基于标准球的星型弹性测针相对工具坐标系迭代标定方法,通过主弹性测针和星型弹性测针分别测量标准球球心,从而获取星型弹性测针工具坐标系相对于主测针工具坐标系的变换关系。同样的,设星型弹性测针的工具坐标系方向与测量机器人末端坐标系方向一致,则星型弹性测针的工具坐标系可描述为

${}^{\text{end}}\mathbf{TCP}_{\text{tool_star}}^k({}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k, {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k, 0, 0, 0)$, k 为星型测针序号, $k = 1, 2, \dots$ 。需注意的是,在标定过程中,需保证标准球固定不动。基于标准球的星型测针工具坐标系在位迭代标定方法的具体步骤为:

1) 对主测针和星型测针分别沿其工具坐标系进行标准球测点;

2) 对上述获得的标准球测点分别采用最小二乘算法拟合空间球,从而计算球心坐标分别为 ${}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k({}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k)$ 和 ${}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k({}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k, {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k)$;

3) 计算星型测针球心坐标相对主测针球心坐标的偏差为:

$$\begin{cases} {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k \\ {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k \\ {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k - {}^{\text{base}}\mathbf{Q}_{\text{end}}^k \end{cases} \quad (17)$$

4) 若上述所得球心坐标偏差均小于阈值0.02 mm, 则结束;若有大于阈值0.02 mm 参数, 则更新星型测针工具坐标系,见式(17)。重复步骤1)~3),直至满足阈值要求,从而得到星型测针的工具坐标系,如式(18)所示。

$$\begin{cases} {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k \\ {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k \\ {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k = {}^{\text{end}}\mathbf{T}_{\text{tool_star}}^k + {}^{\text{end}}\mathbf{\Delta}_{\text{tool_star}}^k \end{cases} \quad (18)$$

4 实验验证

图3为构建的接触式测量机器人测量装置,主要包括六轴协作机器人(工作半径1300 mm、重复精度0.020 mm)、主弹性测针、星型弹性测针、测杆,以及机器人控制器和示教器等组成。在大部件装配中,要求位置测量精度不低于0.100 mm,姿态测量精度不低于



图3 接触式测量机器人装置

Fig. 3 The device of contact-type measuring robot

0.050°。下面先进行弹性测针工具坐标系标定实验,再进行接触式测量机器人的测量精度试验,最后进行位置和姿态测量实验,考察位置姿态测量精度的满足性。

4.1 弹性测针工具坐标系标定实验

图 4 为基于标准球的测针标定示意图,用于获取测针的校准直径、测针工具坐标系。

图 4(c)为在进行测针标定时的测点分布示意,取顶部 1 点、周向均布 4 点。表 1 为不同测针的直径标定结果,表 2 为主测针的工具坐标系标定结果,表 3 为星型测针相对主测针建立的工具坐标系标定结果。

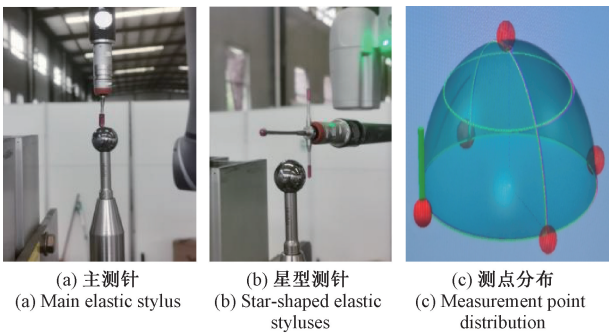


图 4 基于标准球的弹性测针工具坐标系标定

Fig. 4 Calibration of tool coordinate systems of elastic styluses based on standard sphere

表 1 弹性测针直径校准结果

Table 1 Calibration results of elastic styluses diameter (mm)

序号	主弹性测针测点坐标			星型弹性测针 1 测点坐标			星型弹性测针 2 测点坐标			星型弹性测针 3 测点坐标		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	154.643	684.932	415.577	154.100	682.675	415.623	165.158	683.838	405.731	154.087	683.266	394.726
2	143.358	684.898	404.511	143.488	682.631	403.574	153.150	683.836	416.593	143.406	683.270	406.701
3	154.859	673.563	404.510	154.985	673.645	403.579	153.158	672.581	406.050	154.911	673.665	406.706
4	164.162	685.094	404.514	164.067	685.171	403.584	153.153	684.080	393.832	164.068	685.187	406.722
5	153.657	694.414	404.520	152.559	694.258	403.579	153.146	695.322	404.297	152.559	694.272	406.729
标准球直径	19.000											
拟合球直径	20.984			20.976			22.796			20.970		
测针标称直径	2.000			2.000			4.000			2.000		
直径残差	0.006			-0.004			-0.007			-0.003		
测针校准直径	1.978			1.980			3.803			1.973		

表 2 主弹性测针工具坐标系标定结果

Table 2 Calibration results of tool coordinate system with main elastic stylus

序号	位姿 1 测点坐标/mm			位姿 2 测点坐标/mm			位姿 3 测点坐标/mm			位姿 4 测点坐标/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	154.338	684.471	415.685	154.643	684.930	415.623	154.327	684.463	415.685	153.870	672.699	404.937
2	143.326	684.435	404.591	143.341	684.890	404.554	143.322	684.431	404.635	142.916	683.745	404.983
3	154.839	673.605	404.580	154.845	673.602	404.562	154.832	673.601	404.624	154.419	683.778	394.814
4	164.145	685.145	404.591	164.155	685.136	404.565	164.138	685.133	404.637	163.768	683.809	406.336
5	153.633	694.433	404.604	153.653	694.462	404.575	153.623	694.431	404.646	153.266	683.784	415.728
拟合球心	153.763	683.991	405.247	153.759	684.004	405.222	153.757	683.988	405.250	153.372	683.170	405.245
测量 位姿	<i>X</i> /mm	155.627			155.933			155.627			155.449	
	<i>Y</i> /mm	684.482			684.942			684.482			669.612	
	<i>Z</i> /mm	417.937			420.167			417.937			405.885	
	<i>R_x</i> /(°)	-179.999			179.997			-179.999			90.000	
	<i>R_y</i> /(°)	0.000			0.000			0.000			0.000	
	<i>R_z</i> /(°)	179.999			-0.001			179.999			180.000	
球心 残差	Δ <i>x</i> /mm						0.006					
	Δ <i>y</i> /mm						-0.002					
	Δ <i>z</i> /mm						0.005					
测针工 具坐 标系	<i>X</i> /mm						-1.221					
	<i>Y</i> /mm						0.830					
	<i>Z</i> /mm						321.232					

表 3 星型弹性测针工具坐标系标定结果

Table 3 Calibration results of tool coordinate systems with star-shaped elastic styluses

序号	主测针测点坐标/mm			星型测针 1 测点坐标/mm			星型测针 2 测点坐标/mm			星型测针 3 测点坐标/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	154.646	684.930	415.595	154.102	682.668	415.619	165.164	683.838	405.734	154.089	683.269	394.732
2	143.358	684.896	404.528	143.499	682.627	403.584	153.155	683.832	416.591	143.406	683.268	406.699
3	154.866	673.575	404.530	154.999	673.654	403.587	153.167	672.600	406.048	154.914	673.674	406.722
4	164.169	685.114	404.535	164.071	685.181	403.589	153.164	684.100	393.827	164.076	685.198	406.721
5	153.671	694.429	404.555	152.567	694.269	403.584	153.149	695.335	404.299	152.567	694.293	406.720
拟合球心/mm	153.774	683.975	405.197	153.764	683.959	405.200	153.777	683.969	405.206	153.766	683.981	405.202
测量 位姿	<i>X</i> /mm	155.933			171.458			155.239			155.213	
	<i>Y</i> /mm	684.942			684.161			682.967			683.663	
	<i>Z</i> /mm	420.167			406.065			419.938			390.792	
	<i>Rx</i> /(°)	179.997			179.998			-179.999			179.997	
	<i>Ry</i> /(°)	0.000			0.000			-0.001			-0.001	
	<i>Rz</i> /(°)	-0.001			-0.001			-0.001			0.000	
球心 残差	Δx /mm				0.016			0.006			-0.006	
	Δy /mm				0.010			-0.003			0.008	
	Δz /mm				-0.003			0.009			-0.005	

对 4 个弹性测针,其标称直径分别为 2、2、4 和 2,在校准后分别为 1.978、1.980、3.803 和 1.973 mm,校准残差分别为 0.006、-0.004、-0.007 和 -0.003 mm。可以看出测针直径校准精度优于 0.007 mm,为实现空间特征高精度测量提供了基础。

通过表 3 和 4 可以看出,4 个弹性测针工具坐标系的球心标定残差均优于 0.016 mm,即 4 个测针在使用

标定后的测针工具坐标系分别测量同一固定标准球时,球心坐标的相对偏差优于 0.016 mm,具有较高的测针工具坐标系标定精度。通过标准球标定,获得了不同测针的校准直径,可用于后续尺寸高精度测量。同时标定了主弹性测针、星型弹性测针工具坐标系,统一了不同测针的相对关系,为后续多测针协同测量作业提供了基础。

表 4 多弹性测针工具坐标系标定结果

Table 4 Calibration results of tool coordinate systems of multi-elastic styluses

测针	标称直径/	校准直径/	工具坐标系标定					
	mm	mm	<i>x</i> /mm	<i>y</i> /mm	<i>z</i> /mm	<i>Rx</i> /(°)	<i>Ry</i> /(°)	<i>Rz</i> /(°)
主弹性测针	2	1.978	-1.221	0.830	321.232	0.000	0.000	0.000
星型弹性测针 1	2	1.980	-267.110	-4.739	104.707	0.000	0.000	0.000
星型弹性测针 2	4	3.803	-313.390	-5.917	80.861	0.000	0.000	0.000
星型弹性测针 3	2	1.973	-267.053	-5.149	57.185	0.000	0.000	0.000

4.2 接触式测量机器人测量精度实验

为校验接触式测量机器人的测量精度,首先进行单点重复测量实验,观察单点坐标的变化;再进行空间测量实验。图 5 为单点重复测量实验,在设置好机器人路径后,重复采集该点坐标,如表 5 所示。

通过表 5 可以看出,单点空间坐标的变化很小,在 *X* 方向的测量重复性最大为 0.004 mm、在 *Y* 方向的测量重复性最大为 0.012 mm、在 *Z* 方向的测量重复性最大为 0.016 mm。通过单点重复测量实验,说明了接触式六轴测量机器人系统具有较高的单点测量重复性,且已经接



图 5 单点重复测量实验

Fig. 5 Single-point repeated measurement experiment

表 5 单点重复测点坐标

Table 5 Repeated point values of single-point experiment (mm)

序号	接触式测点坐标/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	150.314	776.578	-242.652
2	150.310	776.582	-242.654
3	150.314	776.579	-242.653
4	150.314	776.582	-242.652
5	150.314	776.581	-242.649
6	150.310	776.577	-242.652
7	150.310	776.577	-242.652
8	150.314	776.579	-242.648
9	150.314	776.570	-242.651
10	150.314	776.577	-242.652
平均值	150.313	776.576	-242.648
最大值	150.314	776.582	-242.638
最小值	150.310	776.570	-242.654
极值偏差	0.004	0.012	0.016

近六轴协作机器人的重复精度。说明接触式测量机器人的单点重复测量精度依赖于协作机器人的重复精度。

图 6 为接触式测量机器人空间测量精度实验,通过不同规格的环规、量块考察空间测量精度。

表 6 是不同规格环规测量结果,对直径 9.998 mm 的环规,圆心坐标重复精度最大偏差为 0.015 mm、环规直径测量精度最大偏差为 0.014 mm。对直径 90.001 mm 的环规,圆心坐标重复精度最大偏差为 0.006 mm,环规直径测量精度最大偏差为 0.015 mm。

表 7 为不同规格量块测量结果,通过对长度 50.001、

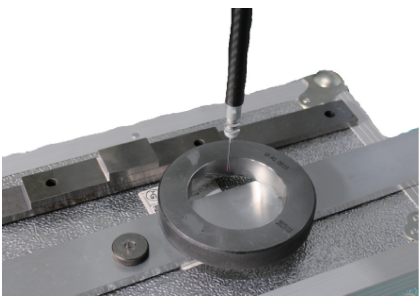


图 6 空间测量精度实验

Fig. 6 Spatial measurement experiment

199.999 和 499.998 mm 的量块长度测量试验,量块长度最大偏差分别为 0.007、0.012 和 0.015 mm,测量重复性优于 0.018 mm,具有较高的空间重复测量精度、空间绝对测量精度。

为进一步验证接触式测量机器人的空间测量精度,参照坐标测量机校准规范^[23],开展了接触式测量机器人的空间测量精度校准实验。表 8 为空间测量校准实验结果,分别对不同规格量块进行测量,最大测量误差分别为 0.008、0.015、0.019、0.022、0.025 和 0.030 mm。可以看出,随着量块尺寸的增大,测量误差呈增大趋势,最大误差不超过 0.030 mm,测量不确定度为 0.004 mm。

4.3 接触式测量机器人位置姿态测量实验

为验证接触式测量机器人的位置和姿态测量精度,以高精度六自由度平台作为基准,评估接触式测量机器人的位置测量精度和姿态测量精度。表 9~10 分别为位移、姿态测量实验结果。在六自由度平台 XY 方向 0.000~10.000 mm 位移实验中,可以看出中心孔、螺孔的最大位移测量偏差分别为 0.038 和 0.050 mm,满足位置测量精度不低于 0.1 mm 的装配测量要求。通过表 10 中 0.010°~1.100°的姿态测量实验,可以看出姿态测量偏差最大 0.010°,满足姿态测量精度不低于 0.05°的装配测量要求。

表 9~10 的六轴台位姿测量误差相对表 6~8 量块和环规测量误差偏大的原因主要是六轴台相对测量机器人摆放位置随机,且柱形测针与通孔、螺孔的轴线不平行导致。在采用六自由度平台进行位姿测量试验过程中,接触式测量机器人按照已设定的固定路径进行采点测量。而在六自由度平台位姿变化后,测针与六自由度平台端面并不是一直处于垂直状态,导致在测量通孔或螺孔时测针的柱状段与通孔或螺孔圆周接触,不仅影响了直径测量精度,也影响了通孔或螺孔的中心位置测量精度。这是导致螺孔实际位置测量误差 0.050 mm 大于空间位置测量精度 0.030 mm 的最大原因。因此在实际使用过程中,需尽可能进行测针半球段接触采点测量,减小测量误差、提高测量精度。

表 6 接触式测量机器人标准环规测量实验结果

Table 6 Experiment results of contact-type measuring robot with standard ring gauge measurement (mm)

序号	校准环规直径 9.998					校准环规直径 90.001				
	实测环规中心坐标			实测直径	测量偏差	实测环规中心坐标			实测直径	测量偏差
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>			<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
1	683.007	-0.198	-23.241	10.002	0.004	684.444	11.832	-18.016	90.005	0.004
2	683.004	-0.195	-23.244	10.012	0.014	684.444	11.834	-18.019	90.008	0.007
3	683.008	-0.190	-23.241	10.010	0.012	684.445	11.836	-18.022	90.013	0.012
4	683.005	-0.194	-23.241	10.010	0.012	684.445	11.833	-18.022	90.008	0.007
5	682.999	-0.194	-23.239	10.004	0.006	684.443	11.833	-18.021	90.009	0.008
6	682.996	-0.197	-23.240	10.010	0.012	684.441	11.837	-18.022	90.014	0.013
7	683.000	-0.196	-23.240	10.004	0.006	684.441	11.835	-18.021	90.009	0.008
8	682.993	-0.197	-23.242	10.002	0.004	684.439	11.833	-18.020	90.007	0.006
9	682.998	-0.194	-23.241	10.008	0.010	684.440	11.834	-18.020	90.007	0.006
10	682.998	-0.196	-23.241	10.007	0.009	684.441	11.832	-18.020	90.016	0.015
最大值	683.008	-0.190	-23.239	10.012	0.014	684.445	11.837	-18.016	90.016	0.015
最小值	682.993	-0.198	-23.244	10.002	0.004	684.439	11.832	-18.022	90.005	0.004
极值偏差	0.015	0.008	0.005	0.010	0.014	0.006	0.005	0.006	0.011	0.015

表 7 接触式测量机器人标准量块测量实验结果

Table 7 Experiment results of contact-type measuring robot with standard gauge block (mm)

序号	校准量块 50.001		校准量块 199.999		校准量块 499.998	
	实测量 块长度	长度 偏差	实测量 块长度	长度 偏差	实测量 块长度	长度 偏差
1	50.002	0.001	199.996	-0.003	500.001	0.003
2	50.003	0.002	199.995	-0.004	500.009	0.011
3	49.997	-0.004	199.993	-0.006	500.011	0.013
4	49.994	-0.007	199.994	-0.005	500.012	0.014
5	49.997	-0.004	199.996	-0.003	500.000	0.002
6	49.998	-0.003	199.987	-0.012	500.001	0.003
7	49.997	-0.004	199.993	-0.006	500.007	0.009
8	49.994	-0.007	199.994	-0.005	500.008	0.010
9	49.996	-0.005	199.995	-0.004	499.994	-0.004
10	49.994	-0.007	199.989	-0.010	500.008	0.010
最大值	50.003	0.002	199.996	-0.003	500.012	0.014
最小值	49.994	-0.007	199.987	-0.012	499.994	-0.004
最大偏差	0.007		0.012		0.014	

表 8 空间测量校准实验结果

Table 8 Results of space measurement calibration experiment (mm)

序号	量块规格						
	50	100	200	300	500	600	
轴 1	1	50.005	100.013	200.017	300.022	500.024	600.026
	2	50.008	100.015	200.018	300.023	500.024	600.027
	3	50.007	100.012	200.017	300.021	500.025	600.028
轴 2	1	50.003	100.008	200.014	300.019	500.023	600.025
	2	50.005	100.009	200.013	300.018	500.025	600.023
	3	50.004	100.007	200.014	300.020	500.022	600.026
轴 3	1	50.004	100.008	200.013	300.020	500.024	600.027
	2	50.002	100.008	200.015	300.021	500.023	600.026
	3	50.003	100.009	200.015	300.019	500.025	600.027
轴 4	1	50.007	100.012	200.017	300.021	500.024	600.029
	2	50.007	100.013	200.019	300.021	500.025	600.028
	3	50.008	100.013	200.017	300.022	500.023	600.030
轴 5	1	50.004	100.010	200.014	300.019	500.023	600.028
	2	50.005	100.009	200.014	300.020	500.022	600.027
	3	50.005	100.011	200.015	300.021	500.023	600.029
轴 6	1	50.006	100.011	200.016	300.020	500.024	600.026
	2	50.005	100.010	200.015	300.019	500.023	600.028
	3	50.006	100.012	200.016	300.021	500.024	600.028
轴 7	1	50.003	100.008	200.014	300.019	500.023	600.028
	2	50.003	100.009	200.013	300.019	500.022	600.027
	3	50.004	100.007	200.012	300.018	500.024	600.029

表 9 接触式测量机器人位移测量实验

Table 9 Displacement measurement experiment of contact-type measuring robot

(mm)

序号	六轴台中心 坐标示值		中心孔坐标				螺孔中心坐标				实际 位移	中心孔位移 偏差		螺孔位移 偏差	
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	直径	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	直径		实测 位移	偏差	实测 距离	偏差
1	0.000	0.000	-0.360	0.215	-0.122	79.217	89.869	0.193	-0.113	5.804	0.000				
2	5.000	5.000	4.599	5.235	-0.085	79.130	94.869	5.220	-0.079	5.812	7.071	7.056	-0.015	7.091	0.020
3	10.000	10.000	9.597	10.204	-0.075	79.141	99.877	10.225	-0.072	5.823	14.142	14.104	-0.038	14.171	0.029
4	0.010	0.020	-0.335	0.234	-0.113	79.191	89.883	0.219	-0.109	5.803	0.022	0.032	0.010	0.029	0.007
5	0.010	0.020	-0.338	0.235	-0.100	79.199	89.890	0.219	-0.094	5.812	0.022	0.037	0.015	0.038	0.016
6	0.020	0.050	-0.341	0.274	-0.070	79.203	89.873	0.262	-0.070	5.789	0.054	0.081	0.028	0.082	0.028
7	0.050	0.100	-0.323	0.323	-0.078	79.189	89.900	0.309	-0.068	5.808	0.112	0.122	0.011	0.129	0.017
8	0.100	0.500	-0.273	0.732	-0.079	79.210	89.932	0.714	-0.067	5.809	0.510	0.527	0.017	0.528	0.018
9	0.500	1.000	0.134	1.237	-0.079	79.188	90.375	1.218	-0.069	5.830	1.118	1.136	0.018	1.144	0.026
10	1.000	2.000	0.601	2.257	-0.072	79.179	90.894	2.236	-0.072	5.877	2.236	2.258	0.022	2.286	0.050
最大值														0.028	0.050
最小值														-0.038	0.007
最大偏差														0.038	0.050

表 10 接触式测量机器人姿态测量实验

Table 10 Pose measurement experiment of contact-type measuring robot

序号	平面测点 1 坐标/mm			平面测点 2 坐标/mm			平面测点 3 坐标/mm			实测姿态/(°)		六轴台姿态 示值/(°)		姿态偏差/(°)	
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>R_x</i>	<i>R_y</i>	<i>R_x</i>	<i>R_y</i>	<i>R_x</i>	<i>R_y</i>
1	-70.012	45.317	-0.007	1.621	-92.769	-0.061	84.206	50.262	-0.036	-0.008	-0.013	0.010	0.020	0.002	0.007
2	-70.014	45.312	0.052	1.626	-92.771	-0.094	84.207	50.256	-0.056	-0.030	-0.043	0.030	0.050	0.000	0.007
3	-70.017	45.303	0.117	1.622	-92.769	-0.164	84.209	50.256	-0.128	-0.059	-0.094	0.060	0.100	0.001	0.006
4	-70.014	45.312	0.222	1.619	-92.768	-0.257	84.212	50.255	-0.155	-0.115	-0.145	0.110	0.150	-0.005	0.005
5	-70.011	45.307	0.251	1.626	-92.764	-0.326	84.209	50.251	-0.133	-0.154	-0.149	0.150	0.150	-0.004	0.001
6	-70.010	45.312	0.250	1.629	-92.771	-0.312	84.211	50.251	-0.131	-0.148	-0.148	0.150	0.150	0.002	0.002
7	-70.016	45.309	0.347	1.625	-92.769	-0.413	84.208	50.251	-0.159	-0.206	-0.196	0.200	0.200	-0.006	0.004
8	-70.017	45.314	0.437	1.625	-92.769	-0.486	84.207	50.252	-0.183	-0.250	-0.240	0.250	0.250	0.000	0.010
9	-70.007	45.310	0.609	1.631	-92.766	-0.579	84.206	50.258	-0.299	-0.304	-0.349	0.300	0.350	-0.004	0.001
10	-70.017	45.313	1.059	1.622	-92.767	-0.915	84.204	50.258	-0.487	-0.504	-0.592	0.500	0.600	-0.004	0.008
最大值														0.002	0.010
最小值														-0.006	0.001
最大偏差														0.006	0.010

为更好描述本文研究的特点,开展了不同测量方法的对比试验,如表 11 所示。

以标准球球心作为不动点,以不同方法下主弹性测针获得的球心坐标作为基准,考察星型测针相对主弹性测针所获球心的位置偏差来表示多测针间的统一关系。可以看出,多点标定法^[12]的多测针球心位置偏差最大达 0.487 mm,是由于该方法假设测针为刚体,采用人工目视方法对准固定点,并通过旋转机器人末端坐标系的角

表 11 不同标定方法结果比较

Table 11 Comparison of calibration results with different methods		(mm)		
标定方法	弹性测针	相对主弹性测针的球心偏差		
		Δx	Δy	Δz
多点标定法 ^[12]	主弹性测针	-	-	-
	星型弹性测针 1	0.316	0.205	0.431
	星型弹性测针 2	0.342	0.261	0.487
	星型弹性测针 3	0.283	0.228	0.466
模型计算法 ^[11]	主弹性测针	-	-	-
	星型弹性测针 1	0.113	0.084	0.178
	星型弹性测针 2	0.141	0.264	0.162
	星型弹性测针 3	0.097	0.171	0.155
本文方法	主弹性测针	-	-	-
	星型弹性测针 1	0.016	0.010	-0.003
	星型弹性测针 2	0.006	-0.003	0.009
	星型弹性测针 3	-0.006	0.008	-0.005

度方式,再进行反复迭代,从而不相关地获得每个测针在机器人末端坐标系下的空间关系,但该方法受机器人的定位精度的影响较大,导致标定后无法实现多个测针工具坐标系的精确统一。模型计算法^[11]的多测针球心位置最大偏差达 0.178 mm,在于其忽略了标定时弹性测针球心与标准球球心的位置对应关系,且采用单次直接标定方式计算测针工具坐标系,导致受机器人定位精度影响较大、标定结果仍无法满足装配位姿的高精度测量需求。本文提出方法,多测针球心位置偏差降低到 0.016 mm,在于对主弹性测针通过建模分析与迭代补偿、对星型测针采用相对迭代补偿等方式获得了精确的多测针相对关系,实现了多测针相对关系的空间统一。

通过基于标准球的多测针在位标定实现了不同测针的相对关系标定,为不同测针的协作测量提供了基础。测针直径校准精度优于 0.007 mm、测针工具坐标系标定精度优于 0.016 mm。对接触式测量机器人进行了单点重复测量精度和空间测量精度实验,单点重复测量精度优于 0.016 mm、空间测量精度优于 0.030 mm。对接触式测量机器人进行了位姿测量精度实验,位置测量精度优于 0.050 mm、姿态测量精度优于 0.010°。接触式测量机器人具有跨尺度高精度测量特点,表现出典型的应用通用性和应用广泛性。

5 结 论

针对传统机器人工具坐标系标定中存在的标定误差大、不适用弹性工具坐标系、难以在位标定等问题,提出

了基于标准球的接触式六轴测量机器人弹性测针工具坐标系在位标定方法。首先推导分析了基于标准球的弹性测针工具坐标系标定原理,在分析标定误差基础上,提出了主弹性测针工具坐标系迭代标定方法、星型弹性测针工具坐标系相对迭代标定方法,实现了不同弹性测针间的统一关系,为多弹性测针协作测量提供了基础。实验显示,接触式六轴测量机器人系统的测针直径校准精度优于 0.007 mm、测针工具坐标系标定精度优于 0.016 mm,单点重复测量精度优于 0.016 mm、空间测量精度优于 0.030 mm,实际位置测量精度优于 0.050 mm、姿态测量精度优于 0.010°。同时实验发现为减小测量误差、提高测量精度,还应尽可能进行测针半球段接触采点测量。接触式测量机器人环境适应性优、材质适应性强、跨尺度测量精度高,能够满足不同部件装配位姿高精度、通用测量需求,具有广泛的工程应用潜力。

参考文献

[1] SHAO CH Y, YU H X, ZHANG L K, et al. Data-driven co-optimization of blade selection and sequencing for aeroengine rotors under industrial assembly constraints[J]. Instrumentation, 2025, 12(4): 7-14.

[2] 赵欢, 葛东升, 罗来臻, 等. 大型构件自动化柔性对接装配技术综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 277-297.

ZHAO H, GE D SH, LUO L ZH, et al. Survey of automated flexible docking assembly technology for large-scale components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(14): 277-297.

[3] 周崩, 褚文敏, 赵鹏. 基于几何感知与像素精确可调超分辨率的航空孔轴结构位姿测量方法[J/OL]. 仪器仪表学报, 1-15[2026-05-20].

ZHOU K, CHU W M, ZHAO P. A method for measuring the pose of aerospace hole-shaft structures based on geometry perception and pixel precisely adjustable super-resolution[J/OL]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1-15[2026-05-20].

[4] 宁睿, 刘志晨, 刘毅, 等. 强化学习引导变导纳控制的机械臂精密轴孔装配模糊位姿估计与精确调整[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 170-177.

NING R, LIU ZH CH, LIU Y, et al. Reinforcement learning guided variable admittance control for fuzzy pose estimation and precise adjustment of robotic precise peg-in-hole assembly[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 170-177.

[5] 于长志, 张连新, 孙鹏飞, 等. 基于法向约束的背靠

- 视觉端面对接定位方法[J]. 计算机工程, 2022, 48(9): 213-222, 229.
- YU CH ZH, ZHANG L X, SUN P F, et al. End-face butt-joint positioning method with back against vision based on normal constraint [J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 213-222, 229.
- [6] 蒋欣怡, 乔贵方, 聂新港, 等. 基于拉线传感器的位姿测量及精度补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 59-66.
- JIANG X Y, QIAO G F, NIE X G, et al. Research on the pose measurement and accuracy compensation method based on draw-wire sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(5): 59-66.
- [7] 王一, 付智超, 程佳, 等. 基于 GTDBO-Perceiver 的工件装配预测控制方法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(20): 154-167.
- WANG Y, FU ZH CH, CHENG J, et al. Predictive control of workpiece assembly based on GTDBO-Perceiver[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(20): 154-167.
- [8] QIAO ZH F, FU K, LIU ZH ZH. An automatic docking method for large-scale sections based on real-time pose measuring and assembly deviation control[J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(11): 686-692.
- [9] 孙阳, 翟雨农, 杨应科, 等. 视觉引导的大部件对接移栽式定位器入位方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(12): 4310-4322.
- SUN Y, ZHAI Y N, YANG Y K, et al. Vision-based mobile positioner insertion method for pose alignment of large components [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(12): 4310-4322.
- [10] 王海亮, 叶南. 螺纹孔视觉定位及多孔对准技术[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(14): 266-274.
- WANG H L, YE N. Visual positioning of threaded holes and multi-hole alignment technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(14): 266-274.
- [11] 郭文婷, 陈东生, 程思博, 等. 面向工件自动化装配的空间位姿柔性接触式测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 75-83.
- GUO W T, CHEN D SH, CHENG S B, et al. Research on the flexible contact measurement method for spatial pose in automated assembly of workpieces [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 75-83.
- [12] 周星, 黄石峰, 朱志红. 六关节工业机器人 TCP 标定模型研究与算法改进[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 186-196.
- ZHOU X, HUANG SH F, ZHU ZH H. TCP calibration model research and algorithm improvement of six joint industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 186-196.
- [13] 宋安玉, 邓惠铭, 杨梁, 等. 视觉引导机器人磨削系统工具坐标系标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 157-168.
- SONG AN Y, DENG H M, YANG L, et al. Research on calibration methods for tool coordinate systems in vision-guided robotic grinding systems [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 157-168.
- [14] LI K Y, HUANG CH K. Efficient and precise laser-assisted calibration of virtual tool center points for robotic systems [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 139(7/8): 3609-3625.
- [15] 储昭碧, 何沅奕, 高金辉, 等. 基于 DQN 和圆拟合的机器人手眼标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 330-340.
- CHU ZH B, HE F Y, GAO J H, et al. Robot hand-eye calibration method based on DQN and circle fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 330-340.
- [16] 温秀兰, 李国成, 宋爱国, 等. 自适应蒙特卡洛法用于机器人标定定位精度可靠性分析研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 341-350.
- WEN X L, LI G CH, SONG AI G, et al. Analysis and study on the positioning accuracy reliability of calibrated robots based on adaptive Monte Carlo simulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 341-350.
- [17] MICHAEL N, BRUNO M, YVES F, et al. Towards a new real-time metrology guidance method for robotized machining of aerostructures robust against cutting fluids and debris [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(5/6): 2647-2663.
- [18] 毛成林, 于瑞强, 宋爱国. 一种结合 TCP 标定的深度相机手眼标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 280-286.

MAO CH L, YU R Q, SONG AI G. A hand-eye calibration method of depth camera combined with TCP calibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 280-286.

[19] PETRI M, PAULI M, JOUNI S M, et al. Vision-aided precise positioning for long-reach robotic manipulators using local calibration[J]. Advanced Robotics, 2024, 38(2): 82-94.

[20] WU H, TIAN D ZH, ZHANG Y, et al. An errors-unidentified hand-eye calibration method via robot relocalization and iterative combinatorial refinement[J]. Measurement, 2024, 226: 114170.

[21] 徐建明, 徐彬彬. 基于可浮动标准球体的机器人 TCP 标定方法研究[J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52(5): 513-520.

XU J M, XU B B. Research on TCP calibration method of robot based on floating standard sphere[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52(5): 513-520.

[22] 王耀南, 谢核, 邓晶丹, 等. 智能制造测量机器人关键技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(16): 1-18.

WANG Y N, XIE H, DENG J D, et al. Overview of key

technologies for measurement robots in intelligent manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(16): 1-18.

[23] 国家市场监督管理总局. JJF 1064—2024 坐标测量机校准规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

State Administration for Market Regulation. JJF 1064—2024 calibration specification for coordinate measuring machines[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

作者简介



于长志(通信作者),2009 年于合肥工业大学获得学士学位,2014 年于吉林大学获得硕士学位,2020 年于中国工程物理研究院研究生院获得博士学位,现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所工程师,主要研究方向为 3D 形貌测量、机器视觉及人工智能。

E-mail:yuczcaep@163.com

Yu Changzhi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2009, his M. Sc. degree from Jilin University in 2014, and his Ph. D. degree from the Graduate School of China Academy of Engineering Physics in 2020. He is currently an engineer in the Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research interests include robotic automated assembly, machine vision and artificial intelligence.