

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312154

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

郭文婷, 陈东生, 程思博, 孙若依

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900)

摘要: 自动化装配精度极其依赖于自动化位姿测量精度。目前常用的位姿测量方法基于非接触式测量方法, 该方法随光照、畸变等影响鲁棒性不高。为提高位姿测量柔性和鲁棒性, 本文提出一种基于接触式位姿测量方法, 该方法基于多测针接触式测量系统, 通过解耦将位姿调节量转化为姿态、圆心、相位相互独立的测量量。首先采用视觉引导方式构建视觉坐标系实现点位测量路径自更新实现柔性测量, 然后通过测量工件平面、圆周、孔位圆周获取坐标点位, 最后采用最小二乘法拟合平面并将圆周点位进行投影拟合圆心, 求解定位孔圆心构成的向量空间夹角得到姿态、相位及圆心的调整量。本文所述方法可以提高测量效率, 解耦调整方式大大降低了位姿联调的相互影响, 提高了位姿测量的柔性和鲁棒性。通过实验对本文所提方法的有效性进行验证, 实验结果表明: 采用空间位姿柔性接触式测量方法进行测量后调整, 其工件相对位置偏差在 0.075 mm 以下, 姿态角度偏差在 0.02° 以下, 相位角度偏差在 0.055° 以下。

关键词: 接触测量; 最小二乘法; 位姿检测; 工业机器人

中图分类号: TH39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 46050

Research on the flexible contact measurement method for spatial pose in automated assembly of workpieces

Guo Wenting, Chen Dongsheng, Cheng Sibao, Sun Ruoyi

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The accuracy of automated assembly heavily depends on the accuracy of automated pose measurement. The commonly used pose measurement methods are based on non-contact measurement methods, which have low robustness due to lighting, distortion, and other factors. To improve the flexibility and robustness of pose measurement, this article proposes a contact-based pose measurement method. This method is based on a multi-probe contact measurement system and decouples the pose adjustment into independent measurements of pose, center, and phase. Firstly, a visual coordinate system is established by using visual guidance to achieve flexible measurement through self-updating of point measurement paths. Subsequently, coordinate points are obtained by measuring the workpiece plane, circumference, and hole circumference. Finally, the least squares method is used to fit the plane and project the circumference points to fit the center of the circle. The vector space angle formed by the center of the positioning hole is solved to obtain the adjustment of posture, phase, and center. The proposed method can improve measurement efficiency, and the decoupling adjustment method greatly reduces the mutual influence of pose tuning, improving the flexibility and robustness of pose measurement. The effectiveness of the proposed method is evaluated through experiments. The experimental results show that the relative position deviation of the workpiece is less than 0.075 mm, the attitude angle deviation is less than 0.02°, and the phase angle deviation is less than 0.055° after the adjustment of the space pose flexible contact measurement method.

Keywords: contact measurement; least square method; pose detection; industrial robot

0 引言

涉及大量轴孔装配特征的装配,如工件端面止口对接、螺孔相位对齐等。为实现高精度、高可靠性的自动化对接过程,减少人工参与,需要对工件之间的相对位姿进行高精度自动化测量^[1]。

空间位姿的描述和转换主要通过坐标系相对于世界坐标系的位置和姿态描述,通过平移变换、旋转变换和符合变换将不同参考坐标系下的位姿信息统一实现坐标转换。空间位姿信息的获取核心在于获取关键点位信息,进而计算整体6D位姿。空间点位测量方式根据测量仪器是否直接接触目标工件表面可分为接触式测量和非接触式测量。一般来说,空间点位坐标的测量可以分为两类:接触式测量^[2]和非接触式测量^[3]。接触式测量相比非接触式测量需要更少的测量点位、造价更低、在工业应用中,无需主动构建特定光照条件,相比非接触式测量,该系统的测量稳定性和可靠性更高。通过获取空间点位坐标,可以拟合特征向量求解位姿参数或构建点云实现位姿求解^[4]。

非接触式测量包括CT测量、红外测量、雷达测量、视觉测量等多种测量方式,其中CT为穿透式测量,获取某一断层轮廓信息,多用于病理分析或微小形变测量^[5],不适用于位姿测量。红外测量基于对温度敏感的原理,多用于测温或小范围无损检测^[6]。雷达根据探测距离远近可分为超声波雷达、毫米波雷达和激光雷达,其中激光雷达^[7]测量距离远,测量精度高,但其获取单一距离信息,对位姿信息的获取需要多组激光传感器,并需要统一标定,且受环境干扰较为严重。基于视觉的位姿测量方法包括DLT法^[8]、PnP求解法^[9]、BA(光束平差法)^[10]等,此类方法基于严谨的数学推理和大量的视觉测量数据,但是在实际位姿测量求解过程中容易受到图像过曝或过暗带来的噪点、相机标定与实际测量状况偏差、边缘提取误差等的影响。总体上,采用非光学类的非接触式测量系统适应性差,针对不同尺寸的工件测量需要适配不同的测量设备,采用光学类非接触式测量方法受外界光照影响大,测量鲁棒性差^[11]。

目前的接触式测量方式主要以三坐标测量仪^[12]测量为代表,使用三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)进行测量有精度高、测量速度快等优势,但传统三坐标测量机测量范围小,只能离线测量,因此对于某些大型工件的在线测量不再适用。以关节式坐标测量机(articulated arm coordinate measuring machine, AACMM)为代表,通过测量回转运动中各个关节角度的变化实现几何量的测量系统,具有测量范围灵活,能测量零件内部尺寸,结构精巧,测量空间开阔,测量范围广等

优点,但是由于其采用铰链式链接结构,结构参数误差会逐级放大,同时通过人工手动进行扫描测量测量准确性受人工影响大,可靠性差。针对关节式坐标测量机的误差问题,国内外不少学者对其标定及误差补偿进行了分析。Benciolini^[13]等构建了基于四元数的误差模型对关节臂式坐标测量机的误差进行补偿,Ibaraki^[14]等通过研究旋转轴的角度位置测量误差并采用R测试进行模型识别。天津大学王学影^[15]的相关研究以误差补偿和参数标定为主,先后提出单孔标定法、点圆标定法、反转标定法、误差分离标定法等。浙江大学高贯斌等^[16]主要针对偏心误差、热变形误差、机械结构变形误差等多种误差源进行分析,从而提高关节臂式坐标测量机的精度。合肥工业大学占瑜毅等^[17]为消除人手接触式测量带来的力变形误差等,提出自驱动关节臂式坐标测量机。安徽理工大学杨洪涛等^[18-19]对自驱动关节臂式坐标测量机的结构设计、系统开发、轨迹优化^[19]等进行了研究,大大提高了其自动化测量能力。

目前接触式测量系统在工业领域的大量应用局限于零件尺寸测量及复杂曲面三维重构,没有应用于位姿测量及解算,且由于接触式测量系统大部分路径固定,难以用于位姿测量这种需要在线反馈的动态测量过程中。本文针对非接触式测量系统在位姿测量方面的局限性和CMM和AACMM在位姿测量上的可行性进行研究,首先设计点位测量算法及设计基于视觉引导^[20]的柔性路径规划方法。其次设计位姿求解算法,通过测量平面点位坐标拟合平面,求解平面法向量沿坐标轴方向的夹角求解姿态信息,将圆周点位投影至平面后拟合圆,位置信息由三维转换为二维信息。螺纹孔坐标投影后拟合孔心,构建空间向量求解相位信息。利用空间几何关系构建基于姿态、圆心、相位的解耦位姿求解算法。最后通过测量辅助装配实验验证本文算法在不同装配位置、不同装配姿态下仍具有较高的位姿测量精度。

1 空间位姿接触式测量方法

1.1 接触式测量系统

在装配对接过程中进行位姿测量时,针对不同尺寸工件之间的对接,由于机械臂六轴臂杆短,难以深入到装配对接所需的狭小空间范围进行测量,故本文设计了如图1的接触式测量系统,通过机器人末端手在眼相机进行视觉引导初步获取孔位特征,在机器人末端附加测杆工装,通过不同测针协同实现工件表面点位坐标的获取,进而通过矩阵变换实现位姿调整量解算,该系统满足了多工件尺寸柔性测量的需求,实现同一部件从5~500 mm直径零件特征的高精度位姿测量,且测量过程采用接触式触头,受环境影响小,提高了测量柔性和鲁棒性。

1.2 点位测量方法

点位测量原理如图1所示,需要对平面三点、圆周三点及螺纹孔圆周点进行测量,测量过程中,使测针竖直向下(或向上),沿着某一方向运行至接触工件表面时,末端模块IO置为高电平,接收到触发信号后机械臂停止运

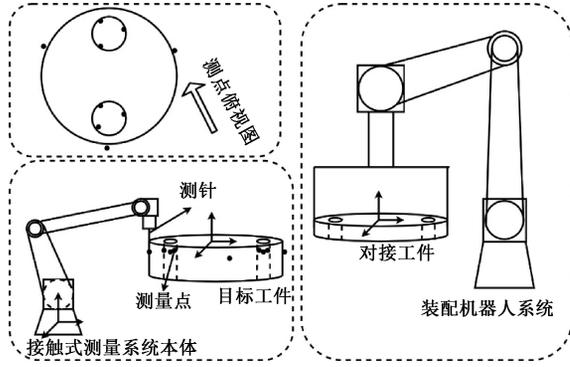


图1 点位测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of point measurement

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

则对接后默认装配机器人坐标系下特征点位姿对应,则在测量坐标系下有:

$$E_{Ci}^D = R_2 E_{Ci}^M + T_2 \quad (4)$$

其中, R_2 、 T_2 表示接触式测量系统下,对接工件表面点位到目标工件表面点位的旋转矩阵和位置矢量。

1.3 柔性引导

接触式测量系统通过测针对目标点位进行测量,其特征点位随着工件初始位置重置,在实际测量过程中,需要对工件位置进行监控以更新测量路径,测量过程涉及小尺寸螺孔特征,其测针测量范围受到螺纹孔的限制大大减小,因此需要对接触式测量系统的测量路径进行自适应变化,从而提高测量柔性。

为解决该问题,本文设计了基于视觉引导的接触式测量系统柔性路径变化方案。利用机械臂末端附加的相机,对工件表面预先拍照制作模板,根据模板状态下的工件建立视觉坐标系,在该视觉坐标系下建立接触式测量路径,在实际测量过程中对工件进行拍照,与模板对比,更新视觉坐标系,从而使得视觉坐标系下的点位随之偏移,从而更新接触式测量系统的测量路径。

2 位姿求解算法

接触式测量系统通过视觉引导到达目标测量点附近,通过接触式测头与工件表面接触后停止运动,在上位

动,测量软件记录当前坐标点位,并将坐标信息通过TCP/IP传递给上位机进行位姿解算处理。

由于接触式测量系统对于点位进行测量时,测针到达测量点位附近,沿固定方向移动至于表面接触停止,为获取目标工件与待测工件之间的相对位姿关系,需要获取足够多的点位信息从而进行相对位姿的解算,本文将位姿信息解耦为五自由度调整量。

对目标工件和对接工件表面特征点进行测量。将测量系统基座坐标系下目标工件上特征点坐标和对接工件上特征点坐标分别表示为:

$$E_{Ci}^M = (E_{Cix}^M, E_{Ciy}^M, E_{Ciz}^M) \quad (i = 1, 2, L, n)$$

$$E_{Ci}^M = (E_{Cix}^M, E_{Ciy}^M, E_{Ciz}^M) \quad (i = 1, 2, L, n)$$

对接工件和目标工件之间的位姿关系可以用五自由度调整量 \vec{X} 表示:

$$X = (x, y, \alpha, \beta, \gamma) \quad (1)$$

式中: α, β, γ 为对接工件相对于目标工件的欧拉角(绕 x 轴转动 α , 绕 y 轴转动 β , 绕 z 轴转动 γ):

$$T = [X, Y, Z] \quad (2)$$

机中获取当前末端测头在系统坐标系下的点位,经解算获取相对位姿。根据解耦调整要求将其分为3部分:姿态求解算法、圆心位置求解算法和相位求解算法。

2.1 姿态求解算法

求解目标工件之间的相对姿态时,非接触式测量常采用求两直线间斜率的方式,由于采用不同的测针进行测量时,无法保证测点位置均上下对应,因此需要对平面进行拟合,求解两平面相对于坐标轴的旋转角度差,即为姿态调整量。

采用接触式测量系统测得工件特征平面三点坐标分别为 $P_{p_1}(x_{p_1}, y_{p_1}, z_{p_1})$ 、 $P_{p_2}(x_{p_2}, y_{p_2}, z_{p_2})$ 、 $P_{p_3}(x_{p_3}, y_{p_3}, z_{p_3})$ 。

则平面拟合方程为:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z + D = 0 \quad (5)$$

多点拟合平面方程,即使得:

$$S = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{A}{C} x - \frac{B}{C} y - \frac{D}{C} - z \right) \rightarrow \min \quad (6)$$

取 $a_0 = -\frac{A}{C}$, $a_1 = -\frac{B}{C}$, $a_2 = -\frac{D}{C}$, 则对 a_0, a_1, a_2 求偏

导得:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 \sum_{i=1}^n (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) x_i = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) y_i = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

改写成矩阵形式得:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(4)可求得两平面方程分别为:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z + 1 = 0 \quad (9)$$

$$A_2 x + B_2 y + C_2 z + 1 = 0 \quad (10)$$

如图2所示为两平面拟合示意图,经平面拟合获得两组平面方程及其法向量。

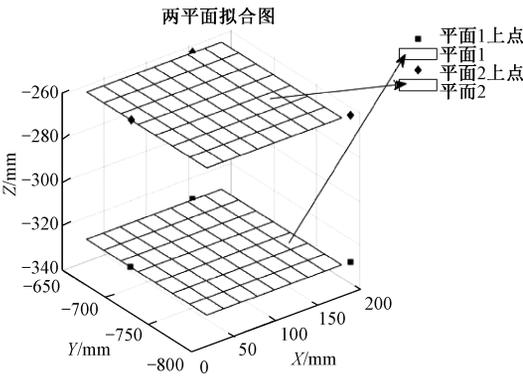


图2 两平面拟合示意图

Fig. 2 Diagram of two planes fitting

已知一个平面的法向量为 (A, B, C) , 若绕旋转轴 (x, y, z) 旋转, 则其余弦夹角为:

$$\cos \theta = \frac{Ax + By + Cz}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (11)$$

因此,求解相对姿态,将平面方程系数归一化得:

$$A_1 = A_1 / \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \quad (12)$$

$$B_1 = B_1 / \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}$$

$$C_1 = C_1 / \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}$$

若对接面水平放置,需求解 R_x, R_y , 则:

$$R_{y_i} = \arccos(A_i) \times 180/\pi \quad (13)$$

$$R_{x_i} = \arccos(B_i) \times 180/\pi \quad (14)$$

则姿态调整量为:

$$R_y = R_{y_1} - R_{y_2} \quad (15)$$

$$R_x = R_{x_1} - R_{x_2} \quad (16)$$

若对接面竖直放置,需求解 R_y, R_z , 则:

$$R_{y_i} = \arccos(A_i) \times 180/\pi \quad (17)$$

$$R_{z_i} = \arccos(C_i) \times 180/\pi \quad (18)$$

则姿态调整量为:

$$R_y = R_{y_1} - R_{y_2} \quad (19)$$

$$R_z = R_{z_1} - R_{z_2} \quad (20)$$

2.2 圆心位置求解算法

由于圆周上测点高度不完全一致,因此需要将其投影至对接平面后拟合圆心,求得相对位移关系。其中,圆周上的点位坐标为 $P_{yi}(x_{yi}, y_{yi}, z_{yi}), i = 1, 2, 3$, 投影到平面的坐标为:

$$x_{ii} = x_{yi} - A_1 \times \frac{A_1 x_{yi} + B_1 y_{yi} + C_1 z_{yi} + 1}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \quad (21)$$

$$y_{ii} = \frac{A_1 x_{yi} + B_1 y_{yi} + C_1 z_{yi} + 1}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \quad (22)$$

$$z_{ii} = \frac{A_1 x_{yi} + B_1 y_{yi} + C_1 z_{yi} + 1}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \quad (23)$$

圆周方程为:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (24)$$

$$\text{取 } Q(a, b, c) = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c$$

对 a, b, c 求偏导得:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)X_i = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)Y_i = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c) = 0$$

用最小二乘法拟合圆心得:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{i1} & y_{i1} & 1 \\ x_{i2} & y_{i2} & 1 \\ x_{i3} & y_{i3} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -(x_{i1}^2 + y_{i1}^2) \\ -(x_{i2}^2 + y_{i2}^2) \\ -(x_{i3}^2 + y_{i3}^2) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{AX} = \mathbf{Y} \quad (27)$$

其中, $a = X(1), b = X(2), c = X(3)$, 圆心为:

$$\left(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}\right), R = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$$

$$\left(-\frac{a_1 - a_2}{2}, -\frac{b_1 - b_2}{2}\right)。$$

2.3 相位求解算法

在位姿解耦调整策略中,根据测量精度需求优先级对姿态、圆心、相位分别调节,因此在相位调节过程中,姿态预先调至相对水平,圆心基本对齐,旋转相位时其相互影响量较小,因此,可以将向量空间夹角作为相位调整量最后进行调整而不影响前述调整过程。

据式(5)、(6)、(23)可求得两工件相互对应的螺纹孔心分别为 $P_{kci}(x_{kci}, y_{kci}, z_{kci}), i = 1, 2, 3, 4$, 则有:

$$\mathbf{n}_1 = (x_{k1} - x_{k2}, y_{k1} - y_{k2}, z_{k1} - z_{k2}) \quad (28)$$

$$\mathbf{n}_2 = (x_{k3} - x_{k4}, y_{k3} - y_{k4}, z_{k3} - z_{k4}) \quad (29)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| |\vec{n}_2|}\right) \times 180/\pi \quad (30)$$

如图3所示, $x'_{kc4} = x_{kc4} + x_{ke1} - x_{kc3}$, 若 $x'_{kc4} < x_{ke2}$, 则:
 $\theta = -|\theta|$ (31)

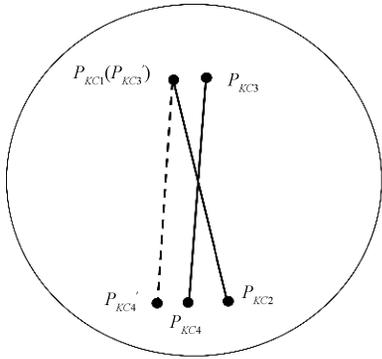


图3 相位求解示意图

Fig. 3 Diagram of phase solution

综上可求得位姿调整量 $X = [x, y, 0, Rx, Ry, \theta]$ 。

3 实验验证

为验证本套接触式测量系统对空间位姿测量的准确性和可靠性,开展了多组实验分别验证视觉引导、圆心位置测量、姿态偏差测量、相位偏差测量等的测量精度。

3.1 实验设备

实验设计并构建了接触式测量系统(如图4所示),选用高灵敏度接触式测量测头(如图4(a)所示)、自制测杆工装(如图4(b)所示)和机械臂作为系统本体(如图4(c)所示)搭建了面向大部件位姿测量的接触式测量系统,采用标定球(如图4(d)所示)进行TCP标定。采用的测量用机械臂其重复定位精度达 $\pm 0.03 \text{ mm}$,其优良的重定位精度保证了在同一姿态下,测量范围内能实现高精度的点位测量,其臂展1.3 m,可实现半径为1.3 m包络球的工作范围内的测量操作。装配过程中采用高精度工业机器人,其重复定位精度达 $\pm 0.08 \text{ mm}$ 。

3.2 实验步骤及结果

针对其视觉引导、位姿测量、装配对接开展了三组实验,其实验步骤和结果如下:

1) 视觉引导验证

为验证视觉引导进行路径柔性变化的效果,设置视觉引导模拟对孔实验,在建立初始拍照模板及视觉坐标系后,在视觉坐标系下设置一组路径导向两螺纹孔中心,改变螺纹孔中心位置后再次拍照识别更新视觉坐标系后寻孔。如图5所示,以特征工件孔心为研究对象,将其分别沿 x 轴平移、绕 Rz 旋转、沿 y 轴平移,在偏移后测量特征孔心获取相对偏差。对比实测值与给定的参考值,探究其视觉引导的效果。



图4 接触式测量系统实验设备

Fig. 4 Experimental equipment for contact measurement system

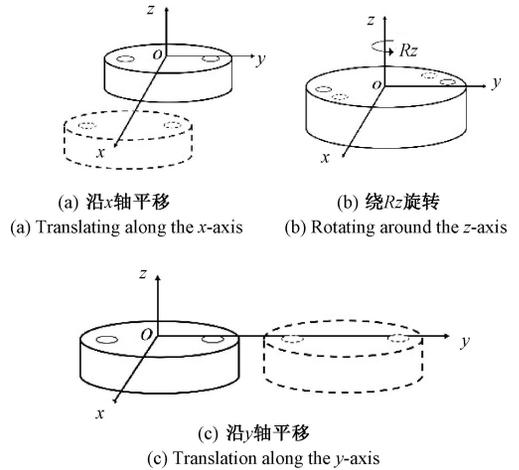


图5 视觉引导实验示意图

Fig. 5 Diagram of visual guidance experiment

测量测针位置与中心位置的偏差,实验结果如表1所示,针对平移的验证实验中,构建的视觉坐标系以测针中心所在的点位 O_c 为原点,以世界坐标系下视觉坐标系原点 ${}^B O_c$ 的偏移量为参考值,特征平移后测针中心距原始位置的测量值为实测值,对比分析视觉坐标系对特征平移后识别的准确性。针对旋转的验证实验中,构建的视觉坐标系以测针中心所在的点位 O_c 为起始,孔位边缘固定点 A_c 为终止点构建向量 $\vec{O_c A_c}$,在世界坐标系下的偏移量为参考值,特征平移后在世界坐标系下 $\vec{O_c A_c}$ 的测量值为实测值,对比分析视觉坐标系对特征旋转后识别的准确性。

表1 视觉引导位置验证

Table 1 Visual guidance position verification

序号	点位	x /mm	y /mm	Rz /($^{\circ}$)	Δx /mm	Δy /mm	Rz /($^{\circ}$)																																																																																												
1	实测值	1.9	0	0	-0.1	0	0																																																																																												
	参考值	2	0	0				2	实测值	4.6	0	0	-0.4	0	0	参考值	5	0	0	3	实测值	9.7	0	0	-0.3	0	0	参考值	10	0	0	4	实测值	0	1.8	0	0	-0.2	0	参考值	0	2	0	5	实测值	0	5.2	0	0	0.2	0	参考值	0	5	0	6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0	参考值	0	10	0	7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11
2	实测值	4.6	0	0	-0.4	0	0																																																																																												
	参考值	5	0	0				3	实测值	9.7	0	0	-0.3	0	0	参考值	10	0	0	4	实测值	0	1.8	0	0	-0.2	0	参考值	0	2	0	5	实测值	0	5.2	0	0	0.2	0	参考值	0	5	0	6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0	参考值	0	10	0	7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2								
3	实测值	9.7	0	0	-0.3	0	0																																																																																												
	参考值	10	0	0				4	实测值	0	1.8	0	0	-0.2	0	参考值	0	2	0	5	实测值	0	5.2	0	0	0.2	0	参考值	0	5	0	6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0	参考值	0	10	0	7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																				
4	实测值	0	1.8	0	0	-0.2	0																																																																																												
	参考值	0	2	0				5	实测值	0	5.2	0	0	0.2	0	参考值	0	5	0	6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0	参考值	0	10	0	7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																																
5	实测值	0	5.2	0	0	0.2	0																																																																																												
	参考值	0	5	0				6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0	参考值	0	10	0	7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																																												
6	实测值	0	9.9	0	0	-0.1	0																																																																																												
	参考值	0	10	0				7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02	参考值	0	0	0.15	8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																																																								
7	实测值	0	0	0.13	0	0	-0.02																																																																																												
	参考值	0	0	0.15				8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04	参考值	0	0	0.5	9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																																																																				
8	实测值	0	0	0.54	0	0	+0.04																																																																																												
	参考值	0	0	0.5				9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11	参考值	0	0	2																																																																																
9	实测值	0	0	1.89	0	0	-0.11																																																																																												
	参考值	0	0	2																																																																																															

由表1可以看出,对接触式测量系统进行视觉引导可以实现高精度的视觉位置引导,平移动后偏差小于1 mm,旋转后偏差小于 0.5° ,在特征位置或角度发生偏移后,经过外置摄像头拍照后与模板对比构建新的视觉坐标系,可以有效将测量特征点更新至调整后的状态,从而实现基于视觉引导的柔性路径规划。

前期的视觉引导实现了可靠的柔性测量,针对工件在装配位附近的微小偏移能够实现准确的螺孔、螺柱识别,从而保证特征点位测量的可靠性。为后续进行高精度的五自由度位姿测量及调整奠定基础。

2) 圆心位置测量验证

轴孔圆心位置测量精度直接决定了轴孔装配对接测量过程的准确性。以六轴台(如图6所示)为测试对象,该六轴台行程达 ± 50 mm/ $\pm 30^{\circ}$,重复精度达 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。选用接触式测量系统对轴孔端面三点进行坐标测量,轴孔圆周面三点进行坐标测量,再将圆周面上测量点的坐标投影到平面上,采用最小二乘法拟合圆心,对比参考值和测量值偏差,验证位姿测量算法的准确性,其中,以六轴台控制器记录的平移或旋转前后圆心作为

参考值,接触式测量系统测量解算的圆心位置作为实测值,对比分析其测量的准确性。标定六轴台坐标系,建立六轴台与接触式测量系统的转换关系。将六轴台固定于底座上,取六轴台平面三点和内孔圆周面三点作为特征点,测量拟合内孔圆心 O_1 ,得到原点坐标,控制六轴台沿 x 轴、 y 轴水平移动,分别得到圆心 O_2 和 O_3 ,构建工具坐标系。

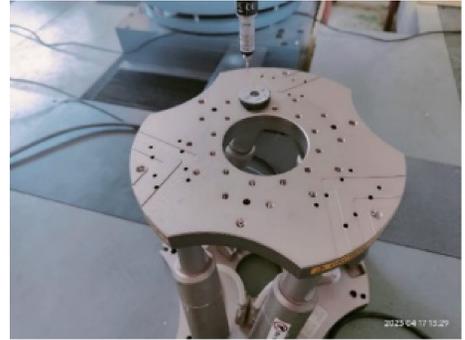


图6 六轴台实物图

Fig. 6 Picture of six axis platform

在新的工具坐标系下,将六轴台分别沿 x 、 y 轴移动,测量拟合圆心,对比参考值与实测值的坐标及距离偏差。验证圆心位置测量的准确性,实验结果如表2所示。

3) 姿态调整验证

在新的工具坐标系下,调整六轴台,使其姿态发生改变,分别绕 R_x 、 R_y 旋转,设置正交实验,测量拟合平面,由式(11)和(12)可以求解其测量并求解得到的姿态偏转量。通过六轴台控制器控制平面发生偏转,其偏转量作为参考值,以接触式测量系统测量平面点位拟合平面后求得的姿态偏转量作为实测值。对比参考值与实测值的姿态角度偏差,验证姿态测量的准确性。实验结果如表3所示,六轴台相位角实测值与理论值相差在 0.08° 以下,对姿态的测量结果满足测量需求。

4) 相位调整验证

在新的工具坐标系下,调整六轴台改变其相位,使其绕 R_z 旋转,测量六轴台上小孔与圆心连线构成的向量绕 R_z 旋转量,由式(30)可以求解其测量并求解得到相位偏转量。以六轴台控制器所示相位偏转量为参考值,接触式测量系统测量点位构建向量变化值作为实测值,对比六轴台参考值与实测值的相位角度偏差,探究相位测量的准确性。实验结果如表4所示,六轴台相位角实测值与理论值相差在 0.01 度以下,对相位的测量结果满足测量需求。

表 2 六轴台圆心位置测量验证

Table 2 Verification of hybrid hexapod center measurement

序号	点位	x /mm	y /mm	Δx /mm	Δy /mm	d /mm
1	实测值	-0.360	0.215	0	0	0
	参考值	0	0			
2	实测值	4.599	5.235	-0.042	0.020	0.046
	参考值	5	5			
3	实测值	9.597	10.204	-0.043	-0.011	0.044
	参考值	10	10			
4	实测值	-0.335	0.234	0.014	-0.001	0.014
	参考值	0.01	0.02			
5	实测值	-0.341	0.274	0.012	-0.001	0.012
	参考值	0.02	0.05			
6	实测值	-0.338	0.234	-0.001	0.009	0.009
	参考值	0.01	0.02			
7	实测值	-0.323	0.323	-0.013	0.008	0.015
	参考值	0.05	0.1			
8	实测值	-0.273	0.732	-0.013	0.018	0.022
	参考值	0.1	0.5			
9	实测值	0.134	1.236	-0.006	0.022	0.023
	参考值	0.5	1			
10	实测值	0.601	2.257	-0.039	0.042	0.057
	参考值	1	2			
11	实测值	-0.366	0.285	-0.026	0.040	0.048
	参考值	0.02	0.03			
12	实测值	-0.366	0.280	-0.026	0.046	0.053
	参考值	0.02	0.02			
偏差				0.043	0.042	0.057

5) 实际装配验证

为验证接触式测量系统辅助对接的能力,设计了接触式测量系统测量辅助对接实物实验,如图 7 所示。

使用接触式测量系统进行位姿测量,控制装配机器人进行调整后装配对接,测量结果如表 5 所示。

分析表 5 数据可知:经测量后调整,(1)姿态偏差由 $(-0.3^\circ, 0.764^\circ, 0.09^\circ)$ 降低至 $(-0.005^\circ, 0.003^\circ, -0.011^\circ)$ 。(2)中心位置偏差从 $(-3.038\text{ mm}, 2.8\text{ mm})$ 降低至 $(-0.016\text{ mm}, -0.075\text{ mm})$ 。(3)测量最大直径达 438.699 mm ,最小直径达 5.527 mm 。实测位姿偏差降低至调控阈值后,装配对接能顺利实现。

表 3 六轴台姿态测量验证

Table 3 Verification of hybrid hexapod attitude measurement (°)

序号	R_x (参考)	$R_y R_z$ (参考)	R_x (实测)	R_y (实测)	ΔR_x	ΔR_y
1	0.010	0.020	0.010	0.015	0	-0.005
2	0.030	0.050	0.039	0.044	0.009	-0.006
3	0.060	0.100	0.059	0.094	-0.001	-0.006
4	0.110	0.150	0.114	0.160	0.004	0.010
5	0.150	0.150	0.154	0.149	0.004	-0.001
6	0.150	0.150	0.148	0.148	-0.002	-0.002
7	0.200	0.200	0.206	0.196	0.006	-0.004
8	0.250	0.250	0.250	0.240	0	-0.010
9	0.300	0.350	0.304	0.349	0.004	-0.001
10	0.500	0.600	0.504	0.592	0.004	-0.008
11	1.000	1.100	1.006	1.085	0.006	-0.015
12	0.500	0.600	0.507	0.608	0.007	0.008
13	0.200	0.200	0.194	0.206	-0.006	0.006
偏差					0.009	0.015

表 4 六轴台相位测量验证

Table 4 Verification of hybrid hexapod phase measurement (°)

序号	R_z (参考)	R_z (实测)	ΔR_z
1	0.010	0.010	0
2	0.030	0.031	0.001
3	0.060	0.056	-0.004
4	0.110	0.113	0.003
5	0.150	0.155	0.005
6	0.150	0.148	-0.002
7	0.200	0.207	0.007
8	0.250	0.251	0.001
9	0.300	0.303	0.003
10	0.500	0.502	0.002
11	1.000	1.007	0.007
12	0.500	0.506	0.006
13	0.200	0.197	-0.003
偏差			0.011



(a) 测量对接工件 (b) 测量目标工件
(a) Measuring docking part (b) Measuring target part

图 7 接触式测量辅助对接图

Fig. 7 Figure of contact measurement assisted docking

表5 零件A与零件B装配对接

Table 5 Assembly docking between part A and part B

测量点	(X,Y,Z)
C(基准3)/mm	(108.794,-753.897,202.407)
C(实测6)/mm	(105.756,-751.097,349.754)
KC1(基准3)/mm	(78.928,-543.478,202.537)
KC2(基准3)/mm	(139.830,-963.917,202.276)
KC1(实测6)/mm	(43.938,-535.867,349.547)
KC2(实测6)/mm	(-49.583,-912.268,352.674)
($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)/mm	(-3.038, 2.8, 147.348)
($\Delta A, \Delta B, \Delta C$)/(°)	(-0.3, 0.764, 0.09)
C(基准)/mm	(108.794,-753.897,202.407)
C(实测2)/mm	(108.778,-753.969,349.581)
KC1(基准)/mm	(78.928,-543.478,202.537)
KC1(实测2)/mm	(139.830,-963.917,202.276)
KC2(基准)/mm	(47.941.938,-538.179,349.762)
KC2(实测2)/mm	(-47.635,-914.463,349.875)
($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)/mm	(-0.016, -0.075, 147.174)
($\Delta A, \Delta B, \Delta C$)/(°)	(-0.005, 0.003, -0.011)
D5(零件3直径)/mm	398.291
D6(零件6直径)/mm	438.699
D7(零件3螺孔直径)/mm	5.527
D8(零件6特征孔直径)/mm	28.465

综合以上结论可知采用该接触式测量系统进行测量辅助对接,能实现用于面向大尺寸工件自动化装配的高精度柔性位姿测量。

4 结 论

本文采用机械臂和高精度测针设计了接触式位姿测量系统,并设计了视觉引导方法和位姿求解算法。实验通过视觉引导实验、六轴台圆心、姿态及相位验证实验以及零件装配对接位姿测量实验验证了该系统的柔性和可靠性。结果表明该测量系统通过视觉引导可以满足不同工件装配对接测量的需求,受环境干扰影响小,具有高柔性和高可靠性。但是相较于非接触式测量方式,其测量效率有待进一步提高,后续可以研究机械臂运行速度和测量精度的关系,在不影响测量精度的前提下提升测量点位时机械臂的运行速度,从而提升测量效率。

参考文献

[1] 朱文福,辛博,顾鑫鑫,等. 三维数字量传递协调的测量辅助装配在自动化柔性工装中的应用[J]. 自动化应用,2023,64(19):124-127.

ZHU W F, XIN B, GU X X, et al. Application of measurement assisted assembly for coordinated transmission of 3D digital quantity in automated flexible fixtures[J]. Automation Applications, 2023, 64 (19): 124-127.

- [2] 姚国兴,李南安,薛晖,等. 接触式空间坐标测量系统[J]. 电子工程师,2001(4):34-37.
- YAO G X, LI N AN, XUE H, et al. Contact type spatial coordinate measurement system[J]. Electronic Engineer, 2001 (4): 34-37.
- [3] QIANG F S, FENG W, FENG H Z, et al. Research on 3D pose measurement algorithm based on binocular vision[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1792(1): 012043.
- [4] YUANPENG L, JUN Z, YIDA L, et al. A high-accuracy pose measurement system for robotic automated assembly in large-scale space [J]. Measurement, 2022, 188: 110426.
- [5] 杜德渝,贾培智,黎雄威,等. 基于工业CT的零件低温微形变测量方法研究[J]. 宇航计测技术,2023, 43(6):71-75,88.
- DU D Y, JIA P ZH, LI X W, et al. Research on low temperature microdeformation measurement method of parts based on industrial CT[J]. Aerospace Measurement Technology, 2023,43 (6): 71-75,88.
- [6] 吴义荣. 数控车床在线检测及偏差自动补偿的实现方法[J]. 金属加工(冷加工),2022(3):74-78.
- WU Y R. Implementation method for online detection and automatic deviation compensation of CNC lathes [J]. Metal Processing (Cold Working), 2022 (3): 74-78.
- [7] 李飞,李翠琴,韩媛. 基于机载激光雷达数据的复杂建筑物三维自动重建方法[J]. 激光杂志,2023,44(12): 212-217.
- LI F, LI C C, HAN AI. A three-dimensional automatic reconstruction method for complex buildings based on airborne LiDAR data[J]. Laser Journal, 2023,44 (12): 212-217.
- [8] 刘书桂,赵金才,李建苹,等. 智能坐标测量系统中零件位姿自动识别[J]. 天津大学学报,2006(10):1241-1246.
- LIU SH G, ZHAO J C, LI J P, et al. Automatic recognition of component pose in intelligent coordinate measurement systems[J]. Journal of Tianjin University, 2006 (10): 1241-1246.
- [9] 陈鹏,王晨晓. IEPnP:一种基于EPnP的相机位姿迭代估计算法[J]. 光学学报,2018,38(4):138-144.
- CHEN P, WANG CH X. IPnP: An iterative estimation algorithm for camera pose based on EPnP [J]. Acta

- Optica Sinica, 2018, 38 (4): 138-144.
- [10] 刘其林,董明利,孙鹏,等. 单目视觉空间移动靶位姿测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (11): 196-204.
LIU Q L, DONG M L, SUN P, et al. Research on pose measurement methods for monocular visual spatial moving targets [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (11): 196-204.
- [11] 朱文山,牟金震,李爽,等. 基于深度学习的航天器位姿估计研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44 (11): 1633-1644.
ZHU W SH, MOU J ZH, L SH, et al. Research progress on spacecraft pose estimation based on deep learning[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44 (11): 1633-1644.
- [12] 陈洪芳,高毅,王帼媛,等. 基于区间层次分析法的三坐标测量机精度分配方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (4): 163-171.
CHEN H F, GAO Y, WANG G Y, et al. Precision allocation method for coordinate measuring machines based on interval analytic hierarchy process[J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44 (4): 163-171.
- [13] BENCIOLINI B, VITTI A. A new quaternion based kinematic model for the operation and the identification of an articulated arm coordinate measuring machine inspired by the geodetic methodology [J]. Mechanism and Machine Theory. 2016, 112:192-204.
- [14] IBARAKI S, SAITO R. Novel kinematic model of articulated arm coordinate measuring machine with angular position measurement errors of rotary axes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2023, 72 (1): 449-452.
- [15] 王学影. 关节臂式坐标测量机系统研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
WANG X Y. Research on joint arm coordinate measuring machine system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [16] 高贯斌,谢佩,刘飞,等. 基于复合标定和极限学习机的关节臂式坐标测量机残差建模及补偿[J]. 光学精密工程, 2023, 31 (22): 3289-3304.
GAO G B, XIE P, LIU F, et al. Residual modeling and compensation of articulated coordinate measuring machines based on composite calibration and extreme learning machines [J]. Optical Precision Engineering, 2023, 31 (22): 3289-3304.
- [17] 占瑜毅,胡毅,胡鹏浩,等. 自驱动关节臂坐标测量机测控系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (12): 93-100.
ZHAN Y Y, HU Y, HU P H, et al. Measurement and control system of self driving joint arm coordinate measuring machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (12): 93-100.
- [18] 杨洪涛,张梦遥,沈梅,等. 自驱动关节臂坐标测量机上位机测控系统软件设计与仿真[J]. 工具技术, 2022, 56 (3): 104-108.
YANG H T, ZHANG M Y, SHEN M, et al. Software design and simulation of upper computer measurement and control system for self driving articulated arm coordinate measuring machine [J]. Tool Technology, 2022, 56 (3): 104-108.
- [19] 杨洪涛,刘月琪,程晶晶,等. 自驱动关节臂坐标测量机轨迹优化[J]. 光学精密工程, 2022, 30 (16): 1978-1987.
YANG H T, LIU Y Q, CHENG J J, et al. Trajectory optimization of self driving articulated coordinate measuring machines [J]. Optical Precision Engineering, 2022, 30 (16): 1978-1987.
- [20] 颜小豪,刘楠,王毅,等. 基于视觉引导的机械臂对接规划[J]. 机械设计与研究, 2023, 39 (5): 38-43, 54.
YAN X H, LIU N, WANG Y, et al. Visual guided robotic arm docking planning [J]. Mechanical Design and Research, 2023, 39 (5): 38-43, 54.

作者简介



郭文婷, 2021年于四川大学获得学士学位, 现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所硕士在读研究生, 主要研究方向为基于机器人的自动装配技术。

E-mail: 13476962056@163.com。

Guo Wenting received her B.Sc. degree from Sichuan University in 2021. She is currently a master student at the Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. Her main research direction is robot based automatic assembly technology.



陈东生(通信作者), 正高级工程师, 2018年于华中科技大学获得博士学位, 硕士生导师, 现在中国工程物理研究院机械制造工艺研究所从事复杂装备开发工作, 主要研究方向为基于机器人的自动装配技术研究。

E-mail: 13518311304@163.com

Chen Dongsheng (Corresponding author) is a professor of engineer. He received his Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2018. He is a master advisor. He is currently engaged in the development of complex equipment at the Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research direction is robot based automatic assembly technology.