

基于激光跟踪关节臂的机器人位姿测量系统研制



黄雷¹, 窦艳红¹, 樊宇¹, 贺志超¹, 张爽², 张立秋¹, 张博¹

1. 吉林省计量科学研究院, 长春 130103

2. 长春工程学院, 长春 130000

【摘要】 机器人位姿检测中, 全测量范围内精度和检测成本之间的平衡始终是研究人员努力的方向。激光跟踪关节臂测量系统采用激光跟踪仪和关节臂坐标机相结合的方式, 利用激光光束跟踪原理, 并结合关节臂高刚性高柔顺性测头, 对机器人位姿进行高精度和低成本检测。实验结果表明, 使用坐标测量机, 通过在不同姿态下对测量系统进行验证, 系统的最大误差出现在 2000 mm 处, 为 -0.042 mm。各点误差均满足 $\pm(30+0.8\times 10^{-5}L)\mu\text{m}$ 的技术指标。

【关键词】 计量学; 机器人位姿检测; 激光跟踪仪; 关节臂坐标机; 坐标转换

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0005

【引用本文】 黄雷, 窦艳红, 樊宇, 等. 基于激光跟踪关节臂的机器人位姿测量系统研制 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 26-31.

Development of a Robot Position and Attitude Measuring System Based on a Laser Tracker and an Articulated Arm Coordinate Machine

HUANG Lei¹, DOU Yanhong¹, FAN Yu¹, HE Zhichao¹, ZHANG Shuang², ZHANG Liqiu¹, ZHANG Bo¹

1. Jilin Institute of Metrology, Changchun 130103, China

2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130000, China

【Abstract】 Due to the limitation of the laser tracking technique in robot position and attitude detection, once the light is blocked, it cannot be detected. A laser tracking joint arm measurement system adopts the combination of a laser tracker and an articulated arm coordinate machine, and uses the principle of laser beam tracking and the high rigidity and flexibility probe of joint arm. It can detect and calibrate the robot's position and attitude. A laser interferometer and a length measuring machine were used to evaluate the system in different attitudes. The experiment results showed that the maximum error of the system was -0.042 mm at 2000 mm. The error at each point did not exceed $\pm(30+0.8\times 10^{-5}L)\mu\text{m}$.

【Key words】 metrology, robot position and attitude measuring, laser tracker, articulated arm coordinate machine, coordinate transformation

0 引言

随着高精度柔性化机器人使用的日益广泛, 其位姿在线检测技术越来越受到人们的重视。一般较常规的检测手段是使用激光跟踪仪, 在被测机器人末端位置安装多个靶球, 通过测量靶球坐标, 计算出机器人末端位置和姿态, 并与机器人控制器标称值进行比较, 计算出机器人的位姿误差。由于该方

法具有精度高、检测速度快等优点, 所以应用范围较广^[1-3]。

由于激光跟踪技术的局限性, 机器人位姿的检测只能在光路不受遮挡的条件下实现, 一旦光线遮挡就无法进行检测。单独运用关节臂坐标机测量机器人, 由于测量范围的限制(测量范围小于 3 米), 从而无法对大尺寸机器人检测^[4-6]。因此, 本文提出采用激光跟踪仪、关节臂坐标机和专用检具相结合

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0212702); 吉林省科技发展计划项目(20200401107GX, 20190302024GX)。

作者简介: 黄雷(1982-), 吉林省计量科学研究院副高级工程师, 研究方向: 几何量专业坐标测量、精密测量, 邮箱: 93768351@qq.com。

的测量方法。利用激光跟踪仪作为主标准器提供标准位移值, 关节臂坐标机通过定位靶球检具与激光跟踪仪发出的光束连接并建立坐标系, 利用关节臂坐标机的柔性测量能力, 在激光跟踪仪光线受遮挡的情况下, 可对机器人各不同位置的全姿态角和位置精度进行检测。同时, 该方法可利用现有装置搭建, 降低了检测设备成本。

1 坐标转换原理

对目标机器人位姿进行检测, 需求解其与激光跟踪关节臂测量系统的坐标关系, 下面对其原理进行简述。

1.1 坐标系定义

为了说明各测量设备之间的坐标关系, 对每台设备定义了相应的坐标系, $\{B\}$ 为机器人基坐标系; $\{T\}$ 为机器人工件坐标系, 在该系统里代表末端专用靶球检具; $\{S\}$ 为激光跟踪仪坐标系; $\{A\}$ 为关节臂测头坐标系; $\{F\}$ 为跟踪定位靶球夹具坐标系; $\{G\}$ 为定位靶球检具坐标系。

1.2 坐标系的转换原理

设笛卡尔坐标系 $\{A\}$, ${}^A P$ 为空间中一个矢量, 则该矢量在 $\{A\}$ 坐标系下可表示为:

$${}^A P = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\{B\}$ 坐标系相对于 $\{A\}$ 坐标系的转换矩阵可表示为:

$${}^A R = ({}^A X_B, {}^A Y_B, {}^A Z_B) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

刚体绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转 θ 角的公式:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

${}^A X_B, {}^A Y_B, {}^A Z_B$ 为坐标系 $\{B\}$ 三个坐标轴的单位矢量。 r_{ij} 是每个矢量在参考坐标系 $\{A\}$ 中, 轴线方向上的投影。由齐次矩阵的性质可知:

$${}^A R = {}^B R^{-1} = {}^B R^T \quad (6)$$

1.2.1 位置转换

已知点 ${}^B P$ 在 $\{B\}$ 坐标系下的位置, 那么可以得

到矢量 ${}^A P$ 在 $\{A\}$ 坐标系的位置坐标为:

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{A-B} \quad (7)$$

${}^A P_{A-B}$ 为 $\{A\}$ 坐标系与 $\{B\}$ 坐标系的平移关系。

1.2.2 姿态转换

已知点 ${}^B P$ 在 $\{B\}$ 坐标系下的姿态, 转换为该点相对于 $\{A\}$ 坐标系的描述 ${}^A P$ 。

$${}^A P = {}^A R {}^B P \quad (8)$$

其中, ${}^A R$ 为 $\{B\}$ 坐标系相对于 $\{A\}$ 坐标系的旋转。

因此, 已知 ${}^B P$ 在坐标系 $\{B\}$ 的描述, $\{B\}$ 与 $\{A\}$ 的平移 ${}^A P_{A-B}$ 和旋转 ${}^A R$, 为了求取 ${}^A P$ 在 $\{A\}$ 坐标系的描述, 定义了一个 4×4 的齐次变换矩阵:

$$\begin{pmatrix} {}^A P \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^A R & {}^A P_{A-B} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^B P \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中, ${}^A T = \begin{pmatrix} {}^A R & {}^A P_{A-B} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, 为坐标系 $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的转换。

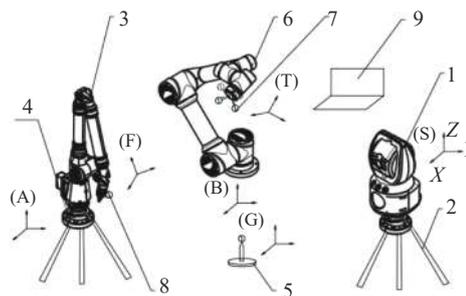
其逆变换为:

$${}^B T = \begin{pmatrix} {}^A R^T & -{}^A R^T {}^A P_{A-B} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2 激光跟踪关节臂测量系统的建立

2.1 激光跟踪关节臂测量系统坐标构建原理

为建立起整个系统的坐标关系, 使用激光跟踪仪作为整个系统的测量标准器, 激光跟踪关节臂测量系统结构如图 1 所示。



1.激光跟踪仪; 2.跟踪仪支架; 3.关节臂坐标机; 4.关节臂支架; 5.定位靶球检具; 6.被测机器人; 7.末端专用靶球检具; 8.跟踪定位靶球夹具; 9.控制电脑

图 1 激光跟踪关节臂测量系统结构
Fig.1 Structure of the measuring system

a. 确定激光跟踪仪坐标系 $\{S\}$ 与关节臂测头坐标系 $\{A\}$ 之间的位姿关系。将激光跟踪仪 1 和跟踪仪支架 2 安放至适当位置, 方便其它设备与其建立起坐标关系。

b. 将关节臂坐标机平稳的安放至便于对机器人

进行测量的位置,并将定位靶球检具 5 安装在关节臂可测量的位置上。使用关节臂坐标机对定位靶球检具 5 进行测量。定位靶球检具 5 由三个高精度标准球组成,球心坐标 $p_i(i=1,2,3)$ 和球间距 $d_i(i=1,2,3)$ 。因此,使用关节臂坐标机对定位靶球检具 5 的三个标准球球心和标准球间距进行测量,通过三个球心建立 ${}^A_G T$ 坐标系,过程如下:

(1)通过球 1 和球 2 建立以定位靶球检具坐标系 $\{G\}$ 到关节臂坐标系 $\{A\}$ 的 x 轴方程 l_x ,以点法线方程表示为:

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p} \quad (11)$$

其中, m, n, p 为 x 轴的方向矢量。

(2)通过球 1 和球 3 建立任意直线 l' ,其与 l_x 又乘可得到 z 轴直线方程 l_z 。

(3)同理 l_x 与 l_z 作叉乘可以得到直线 l_y 。

进而建立关节臂坐标系与定位靶球检具 5 之间的坐标系转换矩阵:

$${}^G_A T = \begin{pmatrix} {}^G_A R & {}^G P_{A-G} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

该矩阵正交可逆,方便后续坐标系的转换。

c.用激光跟踪仪的靶球再次测量定位靶球检具 5,建立起激光跟踪仪坐标系 $\{S\}$ 与定位靶球检具坐标系 $\{G\}$ 之间的转换关系 ${}^S_G T$ 。进而建立起关节臂坐标系到激光跟踪仪坐标系:

$${}^S_A T = {}^S_G T {}^G_A T \quad (13)$$

至此,激光跟踪关节臂测量系统建立完成。

d.使用激光跟踪关节臂测量系统对机器人进行测量。被测机器人为 6R 机器人,即 6 根轴都是回转轴。首先要确定被测机器人的基坐标系 $\{B\}$ 与激光跟踪关节臂测量系统的转换关系:

(1)使机器人回到初始零位,保持其它轴不动,仅转动基座轴 1,间隔 10° ,使用激光跟踪关节臂测量系统测量机器人工件上的专用靶球中心,测量 3 点,从而确定平面 1 方程:

$$A_1 x_1 + B_1 y_1 + C_1 z_1 + D = 0 \quad (14)$$

(2)使机器人回到初始零位,其它轴不动,只旋转轴 2,间隔 5° ,确定基坐标系平面 2:

$$A_2 x_2 + B_2 y_2 + C_2 z_2 + D = 0 \quad (15)$$

(3)通过获取平面 1 与平面 2 的法线矢量 n_1 和 n_2 ,得到机器人基坐标系与激光跟踪关节臂测量系统坐标系 ${}^B_S T$ 的转换数据:

(4)根据上述获得数据,建立机器人的工具坐标系与激光跟踪关节臂测量系统的转换关系:

$${}^T_S T = {}^T_A T {}^A_S T \quad (16)$$

e.通过被测机器人自身的坐标转换关系 ${}^B_T T$ 即可得到机器人工件坐标系与激光跟踪关节臂测量系统的转换关系:

$${}^B_S T = {}^B_T T {}^T_S T = {}^B_T T {}^A_S T \quad (17)$$

这样就确定了各子系统坐标系之间的坐标转换关系。

f.通过激光跟踪关节臂测量系统直接测量机器人工件坐标系(末端专用靶球检具 7)三个定位靶球的球心坐标,该坐标就是机器人末端的实际位置和姿态值,该组测量值与机器人自身转换后的测量值进行比较,即可得到实际的位置和姿态误差值。

g.跟踪定位靶球夹具与关节臂坐标机测头有固定的连接关系,其转换矩阵为 ${}^A_F T$,通过特定的标定方法,可将其坐标系与激光跟踪仪连接,在需要时,可在更大的检测位置移动关节臂坐标机的位置,从而满足机器人的全方位姿态检测。

2.2 激光跟踪关节臂系统的建立

系统工作方式如下:

首先,如图 1 所示,使被测机器人 6 调整至初始工作位姿,在其工作范围内,将激光跟踪仪 1 和关节臂坐标机 3 分别稳固地安装到跟踪仪支架 2 和关节臂支架 4 上,并使二者保持适当的距离,从而满足机器人检测范围要求。使用关节臂坐标机柔性测头测量专用定位靶球检具 5,获得定位靶球的位置坐标。使用激光跟踪仪靶球测量定位靶球检具 5 的坐标,从而获得两者的位置关系。利用专用定位靶球检具 5 的位置坐标,将定位靶球顺畅的装入事先测定好位置关系的专用连接定位靶球夹具 8,这样,关节臂坐标机和激光跟踪仪通过定位靶球连接完成,形成激光跟踪关节臂测量系统。使用激光跟踪关节臂测量系统对被测机器人 6 本体基坐标系进行测量,使激光跟踪关节臂测量系统坐标系归结到机器人基坐标系中。再利用激光跟踪关节臂测量系统测量末端专用检具 7 获得各点的位姿坐标。利用专用机器人测量软件和机器人控制器,使被测机器人 6 进入初始工作状态,按照国标 GB/T 12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》对机器人的位姿进行检测。检测完成后,根据检测结果判断机器人是否满足相关技术要求,测量步骤如图 2 所示。

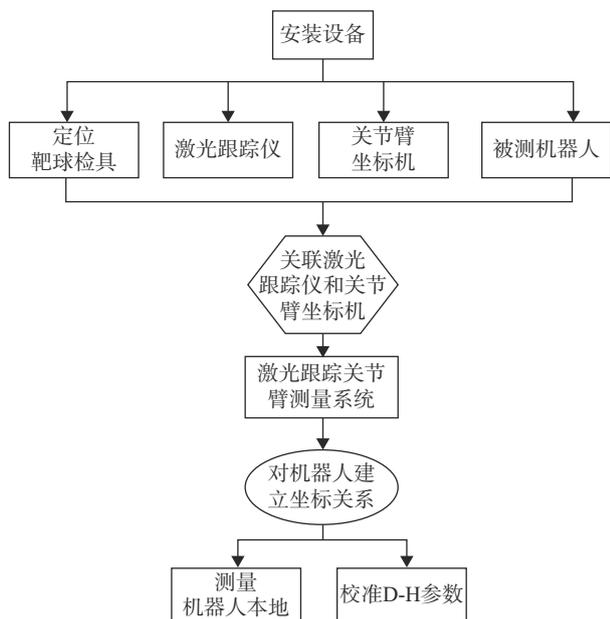


图 2 激光跟踪关节臂测量系统测量步骤
Fig.2 Steps in measurement using the system

2.3 激光跟踪关节臂系统的技术分析

a. 由于激光跟踪技术的局限性，一旦光线遮挡就无法进行检测，从而影响机器人的位姿和轨迹检测精度。该系统利用激光跟踪仪的测距精度优势，并结合关节臂坐标机测头的高刚性高柔顺性的特点，可以在被测机器人不同位置和姿态角下对其进行检测，避免了光线遮挡带来的无法全面检测^[7,8]。

b. 原有激光跟踪的测量方法如需对被测机器人全位置和全姿态进行检测，需要移动多个位置，不仅耗时耗力、效率低下，也不能一次性全面的对机器人进行检测，无法兼顾效率、精度以及机器人各关节精度连续测量的要求。该系统可在被测机器人工作范围内的任意位置和姿态下对其一次性检测，检测期间不用移动激光跟踪仪，只需移动关节臂坐标机即可^[9-13]。而且通过将定位靶球检具 5 向关节臂坐标机根部加长，可进一步延长测头范围(最大到 2.9 m 左右)。

c. 对于单独使用关节臂坐标机测量机器人的方案，由于测量范围的限制(测量范围小于 3 m)，无法对较多机器人进行检测^[6]。

d. 通过测量定位靶球检具和专用连接定位靶球夹具，建立起激光跟踪仪、关节臂坐标机、定位靶球检具和专用连接定位靶球夹具之间的坐标系关系，这样可以通过坐标系的转化，任意在各个坐标系之间切换^[14,15]。例如，使用激光跟踪仪基坐标系确定各子系统的关系后，可将关节臂坐标机作为测量基

准，而移动激光跟踪仪的位置，通过关节臂或者定位靶球检具，重新找回激光跟踪仪移动后的位置，这是之前所述机器人检测系统所不具备的。

3 实验部分

3.1 激光跟踪关节臂测量系统精度验证

首先对激光跟踪关节臂测量系统的绝对定位精度进行测量。实验采用了 3 m 坐标测量机作为标准器，其示值误差为 $MPE: \pm(2.2+L/300)\mu m$ ，实验装置如图 3 所示。使用标准球在坐标机的 3 m 工作台上均匀布置 11 个测量点，首先通过坐标测量机的测头系统对这 11 个测量点的球心坐标进行高精度检测，其球心间距作为标准值。

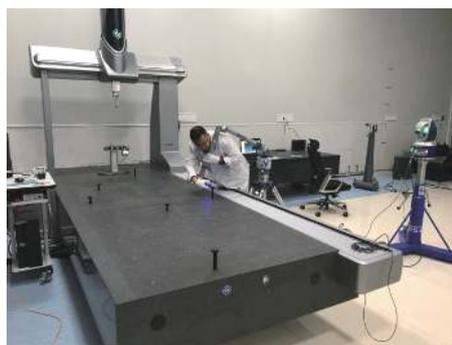


图 3 激光跟踪关节臂测量系统精度校准装置图
Fig.3 Calibration device for the system

使用激光跟踪关节臂测量系统对事先标定好的 11 个定位点进行测量，正反行程为一个测回。第二测回和第三测回作为与第一测回的比较，分别将关节臂姿态任意旋转一定的对应角度再次测量(注：角度的选取尽量使各关节角度范围在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 以内，避免产生奇异点)，这样可以验证在不同姿态下对系统精度的影响量。

由图 4 可以看到，第二测回角度旋转和第三测回角度旋转，由于关节臂自身引入的不确定度影响，与标准位置的测量值相比有一定的变化，其中第三测回误差在 1400 mm 以前是正向的，过了该点以后有一个名下的负向差值，表明系统的关节臂测头带来的误差较为明显。系统的最大误差出现在 2000 mm 处，为 -0.042 mm 。通过在不同姿态下对测量系统的检测，各个点误差均没有超过 $\pm(30+0.8 \times 10^{-5}L)\mu m$ 的技术指标。

3.2 位置和姿态精度测试

应用该装置对国产 6 轴协作机器人进行了位置和姿态精度进行了测试，其 D-H 参数如表 1 所示。坐标轴方向如图 5 所示。

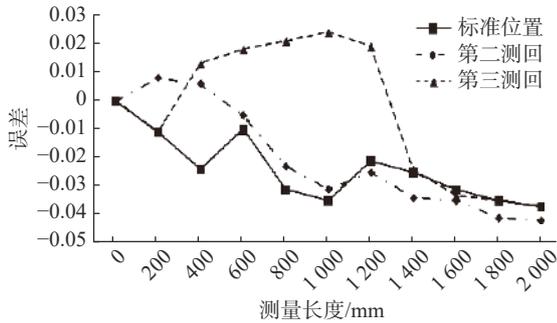


图 4 精度校准结果
Fig.4 Calibration results

表 1 某 6 轴机器人 D-H 参数

Tab.1 D-H parameters of a 6-axis robot

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	131	425	θ_3
4	-90°	127	392	θ_4
5	90°	0	0	θ_5
6	-90°	0	0	θ_6

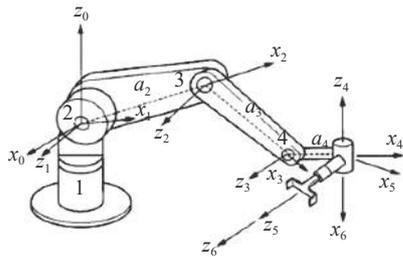


图 5 某型号 6 轴机器人坐标系示意图
Fig.5 Schematic of the coordinate system of the 6-axis robot

按照国标 GB/T12642—2013、ISO9283:1998 的检测要求建议,在机器人常用位姿建立检测立方体,并在该立方体内对应的一个对角面进行检测,如图 6 所示。标准选用上述方法的原因在于,现有检测手段由于光线遮挡的局限性,只能部分测量机器人的位姿参数。而激光跟踪关节臂测量系统,可以在机器人的全方位位置上,对相应立方体内的四个推荐对角平面进行检测,进而可以全面的评价机器人的各姿态下的位姿精度^[16,17]。

为了便于体现同一位置不同姿态对测量结果的影响,在相同位置条件下,分别使机器人旋转 90° 、 180° 和 270° (此时传统激光跟踪测量方法光线受到机器人转角的遮挡),使用激光跟踪关节臂测量系统测量其位姿误差。

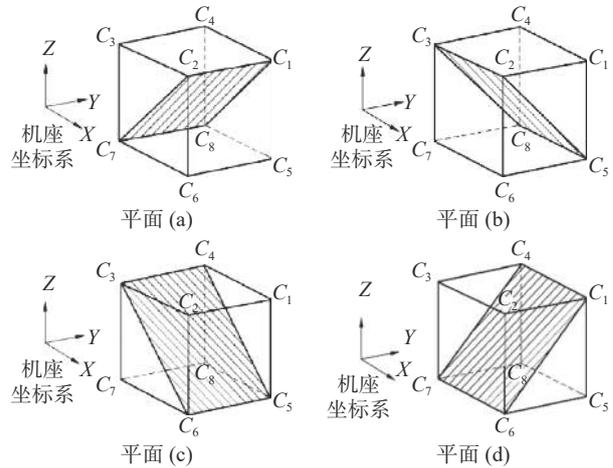


图 6 机器人检测位置
Fig.6 Test points

实验选择立方体平面(a),测量点的顺序为:P1-P5-P4-P3-P2,被测机器人从 P1 点开始依次对各点进行测量,此为一个测回,测量 30 次求平均值。按照下式计算位置准确度:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (18)$$

其中, \bar{x} 、 \bar{y} 和 \bar{z} 为各点平均值, x_c 、 y_c 和 z_c 为指令位姿。

点 P1 到点 P5 为一个姿态角,该位置激光跟踪仪可以测量到, P6 到 P10 为绕 X 轴旋转 90° ; P11 到 P15 为绕 X 轴旋转 180° ; P16 到 P20 为绕 X 轴旋转 270° ,对同一位置不同姿态进行测量。从点 P6 到 P20 的位姿点,激光跟踪仪是无法测量的,或测量不全,必须使用激光跟踪关节臂测量系统。实验结果如图 7 所示,从实验数据看,各点的测量结果在 X 轴旋转了 180° 和 270° ,即 P10 到 P20 点,整体误差趋于负方向, Y 轴误差点趋势大致相同, Z 轴分别在 P5 和 P17 点出现了正方向的极大值 0.686 mm 和负方向的极大值 -0.400 mm, 其和正向值 P5 点之差接近 1 mm。因此可以判断,对机器人全姿态角度的测量是有必要性的,可以获得机器人位姿更全面的检测结果。



图 7 各测量点 XYZ 测量数据变化
Fig.7 XYZ measurements versus measurement points

4 结论

激光跟踪关节臂测量系统采用激光跟踪仪和关节臂坐标机相结合的方式,利用激光光束跟踪原理,并结合关节臂高刚性高柔顺性测头,对机器人全方向的位姿进行高精度检测。实验结果表明,使用坐标测量机,通过在不同姿态下对测量系统进行检测,系统的最大误差出现在 2000 mm 处,为-0.042 mm。各个点误差均满足 $\pm(30+0.8\times 10^{-5}L)\mu\text{m}$ 的技术指标。

参考文献

[1] 任瑜,张丰,郭志敏,等.利用 Leica 激光跟踪仪对工业机器人现场标定的方法[J].计量技术,2019,543(11):64-68.
 [2] 任国营,王为农,苏永昌,等.激光跟踪仪动态参数自动测试系统设计[J].计量学报,2008,29(2):114-116.
 [3] 温秀兰,崔俊宇,芮平,等.激光跟踪仪现场校准设备相关问题探讨[J].计量技术,2017,523(1):36-38.
 [4] 董琳.6R 型工业机器人精度分析与结构参数标定的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
 [5] 童洋洋.6R 型工业机器人标定技术研究及算法实现[D].合肥:合肥工业大学,2017.
 [6] 任永杰,郝继贵,杨学友,等.利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J].机械工程学报,2007,43(9):195-200.

[7] 任永杰.测量机器人本体标定技术要求[D].天津:天津大学,2007.
 [8] 李定坤,叶声华,任永杰,等.机器人定位精度标定技术的研究[J].计量学报,2007,28(3):224-227.
 [9] 赵学峰.机器人动态追踪系统的标定技术研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2019.
 [10] 赵海鹏,杜玉红,丁娟,等.移动机器人中激光雷达测距测角标定方法[J].红外与激光工程,2019,11(6):371-378.
 [11] 张晓平.六轴自由度关节型机器人参数标定方法与实验研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
 [12] 魏霖.多关节坐标测量机的坐标转换和参数标定[J].光电工程,2007,34(5):57-61.
 [13] 于连栋,程文涛,费业泰.基于激光跟踪仪的关节式坐标测量机参数标定[J].中国科学技术大学学报,2009,39(12):1329-1332.
 [14] 温瑞.六自由度测量机器人误差分析与仿真[D].西安:西安理工大学,2008.
 [15] 谷乐丰,杨桂林,方灶军,等.一种新型机器人自标定装置及其算法[J].机器人,2020,42(1):1-3.
 [16] 李瑞峰,候琪琳,陶谦.机器人末端工具参数自动标定方法[J].哈尔滨工业大学学报,1998,30(2):74-76.
 [17] 国家质量监督检验检疫总局.工业机器人性能规范及其试验方法:GB/T 12642-2013[S].北京,2014.

本文编辑:霍祎炜

(上接第 21 页)

得到的修正系数也会偏大。在相同的开孔孔径情况下,不同光源测量对于最后得到的修正系数影响不大,这是由于考虑了光谱光视效率 $V(\lambda)$ 的影响。用辐射功率法测量时,建议在 5 mm、8 mm、10 mm 中选择大于激光光斑直径的开孔尺寸。

4 结论

通过两种光通量计校准方法的实验结果分析,在积分球相同的开孔孔径条件下,两种方法得到的实验结果具有较好的一致性。开孔孔径相对较大的情况下,得到的实验结果会存在一定的偏差,这是由于部分光从积分球反射出来导致的,根据实际情况选用合适的孔径测量非常重要。采用辐射功率法测量时,注意所用激光光源的光斑直径要小于开孔孔径,让光能够完全入射到积分球里面。本文给出了此类仪器采用不同方法测量时,开孔尺寸的选择建议,为此类仪器的准确测量提供参考。

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局.光学辐射计量名词术语及定义:JJF 1032-2005[S].北京:中国标准出版社,2015.
 [2] 王建平,乔波,霍磊,等.分布光度计的校准和比对分析[J].照明工程学报,2017,28(2):32-36.

[3] 颜台永.光通量测试技术探讨[J].中国照明电器,2001(7):17-19.
 [4] 国家质量监督检验检疫总局.总光通量标准白炽灯:JJG 247-2008[S].北京:中国计量出版社,2008.
 [5] 汪立文,万蕴杰.分布式光度计校准方法与光通量示值测量结果不确定度的研究[J].计量与测试技术,2012,39(2):63-64.
 [6] 国家质量监督检验检疫总局.光通量的测量方法:GB/T 26178-2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
 [7] 刘慧,赵伟强,刘建,等.LED 总光谱辐射通量测量技术的研究[J].计量学报,2014,35(6):574-577.
 [8] 赵伟强,刘慧,刘建,等.球形光度计计量 LED 总光通量的关键技术[J].照明工程学报,2014,25(3):13-15.
 [9] 郝允祥.光度学[M].北京:中国计量出版社,2010.
 [10] 刘慧,杨臣铸.光度测量技术[M].北京:中国计量出版社,2011.
 [11] 吴志峰,代彩虹,赵伟强,等.基于可调谐激光的光谱辐射照度响应度定标[J].光谱学与光谱分析,2021,41(3):853-857.
 [12] 王雪莲,吴志峰,宋贵才,等.激光大动态范围线性测量[J].应用光学,2019(40):681.
 [13] 罗宇鹏,吕亮,林晓峰.便携式照度计的设计与实现[J].计量技术,2020,4:6-10.
 [14] Godo K, Tamura Y, Watari O. Illuminance meter calibration with an LED spectrally tunable light source[J]. Lighting Research & Technology, 2020, 52(8): 1009-1019.
 [15] Bai Xu. Calibration technology and application of laser power meter[J]. The Journal of Engineering, 2019(23): 8806-8811.

本文编辑:石亚楠