

关节臂式坐标测量机垂直度误差标定方法

王学影 王 华 陆 艺 张培培

(中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了实现对关节臂式坐标测量机垂直度误差的直接标定, 提出两点对称法的标定方法。首先, 建立了关节臂式坐标测量机的数学模型, 得出运动学方程。其次, 分析了关节臂式坐标测量机垂直度误差的标定原理, 推导出垂直度误差的求解公式。最后, 在 ROMER Infinite 2.0 型关节臂式坐标测量机上进行了实验, 利用测量标准球的实验对标定结果的准确性进行了验证。通过标定可以提高关节臂式坐标测量机的精度, 使关节臂式坐标测量机测量结果的相对误差由原来的 0.384% 减小到 0.225%。

关键词: 关节臂式坐标测量机; 垂直度误差; 两点对称法; 标定

中图分类号: TH721 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0408-06

Perpendicularity Error Calibration Method of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine

Wang Xueying Wang Hua Lu Yi Zhang Peipei

(Institute of Precision Measurement and Control, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: At present, the articulated arm coordinate measuring machine is playing more and more important role in industrial production. But due to its special structure, the small change of the joint angle can cause large measurement error. So the calibration of the angle variable error can effectively improve the measurement accuracy of the articulated arm coordinate measuring machine. In order to realize the direct calibration of the articulated arm coordinate measuring machine's perpendicularity error, the two symmetric point method was put forward. Firstly, the mathematical model of the articulated arm coordinate measuring machine was established and the kinematics equation was obtained. Secondly, the perpendicularity error calibration principle was analyzed and the perpendicularity error calculation formula was obtained. Finally, with the help of the mechanical fixture, the experiments were carried out on the ROMER Infinite 2.0 articulated arm coordinate measuring machine. The accuracy of the calibration results was verified by the measurement experiment of the standard ball. This method can make the measuring result of the articulated arm coordinate measuring machine relative error reduce from 0.384% to 0.225%. The calibration method can improve the measurement accuracy of the articulated arm coordinate measuring machine. This research laid a good foundation for the further research of the measurement accuracy of the articulated arm coordinate measuring machine.

Key words: articulated arm coordinate measuring machine; perpendicularity error; two symmetric point method; calibration

引言

近几年,随着工业生产越来越趋向智能化、柔性

化、集成化和自动化,对高精度的测量仪器的需求也越来越大^[1-2]。关节臂式坐标测量机因具有体积小、质量轻、便于携带、测量灵活量空间大等优点而

得到广泛的应用。但是关节臂式坐标测量机特殊的结构给测量系统引入了很多误差源,从而影响了测量精度。采用高精度的标定方法可以有效提高关节臂式坐标测量机的测量精度^[3]。标定的对象主要有长度量和角度量两种,角度的偏差对关节臂式坐标测量机的精度影响较大。对长度量标定方法的研究较多而对于角度量的标定方法的研究较少。

对角度量标定方法的研究逐渐成为一个热点。许多学者都对关节臂式坐标测量机与角度量相关的各种误差进行了研究。高贯斌等^[4]对关节臂式坐标测量机关节转角误差进行了研究;杨新刚等^[5]利用激光干涉仪回转轴校准系统建立了一种综合考虑大周期误差及小周期误差的三次封闭样条与三角函数相叠加的回转运动误差补偿模型,对整个行程的关节误差进行补偿。王文等^[6]对关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数进行了研究;胡鹏等^[7]对柔性测量臂关节零位偏差的标定算法进行了研究。通过对各种误差的研究和标定可以提高关节臂式坐标测量机的测量精度。

现有的角度误差研究方法大多需要借助高精度的角度传感器,测量成本高,且不能直接测得角度量,需要复杂的转换过程。两点对称法的研究方法可以很好地弥补上述研究方法存在的缺点和不足,该方法可以实现直接对角度量的测量。因此,本文利用两点对称法对关节臂式坐标测量机的垂直度误差进行研究。

1 关节臂式坐标测量机测量模型

在关节臂式坐标测量机的抽象测量模型中可以清晰地完成对垂直度误差的分析,因此要先建立关节臂式坐标测量机的测量模型。

1.1 关节臂式坐标测量机结构与原理

关节臂式坐标测量机由 6 个关节、2 个测量臂和基座组成,结构简图如图 1 所示。

它是一种非笛卡尔式坐标测量系统,可以由人牵引着它的测头端在空间自由移动,完成对被测物体的测量^[8]。6 个关节处都装有角度编码器,当测量物体时,角度编码器会记录各关节角度的读值,然后结合关节臂式坐标测量机的结构参数即可得出空间点的坐标值。

1.2 数学模型的建立

D-H 方法是 1955 年由 Denavit 和 Hartenber 提

$$T_i^{i+1} = \mathbf{Rot}(Z_i, \theta_i) \mathbf{Trans}(Z_i, d_{i+1}) \mathbf{Trans}(Y_i, b_{i+1}) \mathbf{Trans}(X_i, a_{i+1}) \mathbf{Rot}(X_i, \alpha_{i+1}) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i+1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i+1} & a_{i+1} \cos\theta_i - b_{i+1} \sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_{i+1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i+1} & a_{i+1} \sin\theta_i + b_{i+1} \cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i+1} & \cos\alpha_{i+1} & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

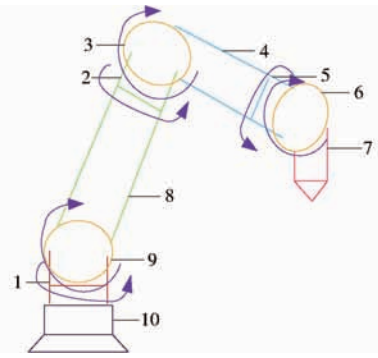


图 1 关节臂式坐标测量机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of articulated arm coordinate measuring machine

1. 关节 1 2. 关节 3 3. 关节 4 4. 测量臂 2 5. 关节 5 6. 关节 6
7. 测头 8. 测量臂 1 9. 关节 2 10. 底座

出的,此后广泛应用于杆件相互关系的分析^[9-10]。本文采用 D-H 方法,建立了关节臂式坐标测量机的数学模型,如图 2 所示。

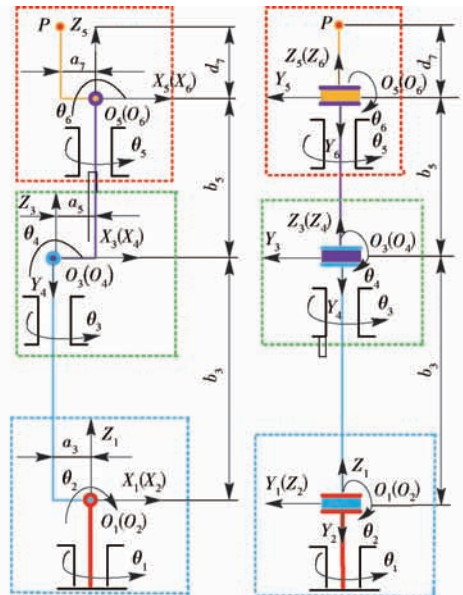


图 2 数学模型

Fig. 2 Mathematical model

图中 $O_1 \sim O_6$ 为各关节坐标系的原点, $\theta_1 \sim \theta_6$ 为 6 个关节的角度量, b_3 、 b_5 分别是 2 个测量臂的长度, a_3 、 a_5 、 a_7 是关节臂在 X 轴方向上的偏置, d_7 是测头端在 Z 轴上的偏置。在该模型中相邻关节坐标系的空间关系用一个 4×4 的齐次变换矩阵来表示^[11-12]。本实验中用到的是 6 自由度的关节臂式坐标测量机,要得到测头点在参考坐标系中的坐标值需要经过 7 次坐标变换。相邻坐标之间的变换矩阵为^[13-14]

式中 X_i, Y_i, Z_i —— i 取 1 ~ 6 时, 对应的 6 个关节处坐标系的坐标

α_i —— Z_{i-1} 轴转到 Z_i 轴绕 X_{i-1} 轴转过的夹角

$\text{Rot}()$ ——绕坐标轴的旋转矩阵

$\text{Trans}()$ ——相对坐标轴的平移矩阵

测头点 P 在坐标系 $O_6 X_6 Y_6 Z_6$ 中的坐标记为 (x_6, y_6, z_6) , 其坐标值为

$$\begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_7 \cos \theta_6 - b_7 \sin \theta_6 \\ a_7 \sin \theta_6 + b_7 \sin \theta_6 \\ d_7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将相邻位置连杆之间齐次变换矩阵相乘即可得到测头中心点 P 在基坐标系中的坐标, 记为 (x, y, z) , 关节臂式坐标测量机的运动学方程为^[15]

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 垂直度误差分析

垂直度误差是相对于理想坐标系来定义的。在理想数学模型(图 2)中, Y_i 和 Z_{i+1} 坐标轴重合, 实际上由于关节臂式坐标测量机的加工和装配时存在误差, 使得在 YZ 平面上这 2 个坐标轴不可能完全重合, 存在垂直度误差, 如图 3 所示, 图中 $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \Delta\alpha_3, \Delta\alpha_4, \Delta\alpha_5, \Delta\alpha_6$ 为垂直度误差。

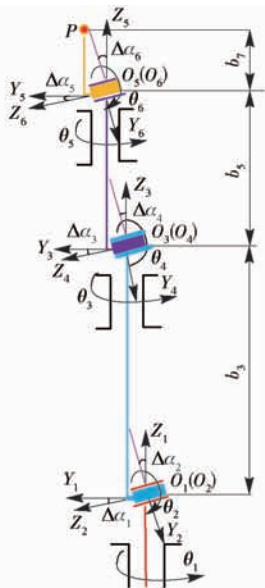


图 3 垂直度误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of perpendicularity error

3 实验原理分析

利用两点对称法的思想, 通过对关节臂式坐标测量机各种姿态的组合和旋转来测量垂直度误差。

该方法可以将各被标定参数相互分离, 从而减少标定过程中的误差。

3.1 垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 的标定

垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 在关节 5 和关节 6 这两个坐标系中。为了标定该参数, 在忽略零位偏心的前提下, 先在关节 5 和关节 6 均处于零位即 $\theta_5 = 0^\circ$ 和 $\theta_6 = 0^\circ$, 关节 1 ~ 4 的转角可以为方便测量的任意值, 在这种位姿下, 将关节 1 ~ 4 固定, 将关节 5 和 6 固定在一起, 如图 4a 所示, 测量 P_1 点的坐标值。然后保持关节 1 ~ 4 的姿态不变, 将关节 5 绕坐标轴 Z_5 轴旋转 180° , 即使 $\theta_5 = 180^\circ$ 和 $\theta_6 = 0^\circ$, 在这种位姿下, 再次将关节 5 和 6 固定如图 4b 所示, 测量该姿态下 P_2 点的坐标值。 P_1 和 P_2 两点之间的距离记为 $L_{P_1 P_2}$, 由此可得垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 的表达式

$$\Delta\alpha_6 = L_{P_1 P_2} / (2b_7) \quad (4)$$

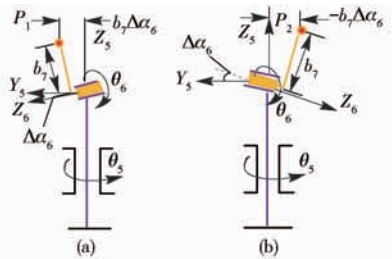


图 4 垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 的标定

Fig. 4 Calibration of perpendicularity error $\Delta\alpha_6$

3.2 垂直度误差 $\Delta\alpha_5$ 的标定

对于垂直度误差 $\Delta\alpha_5$ 的标定方法是借助 2 个曲面法向量的夹角。实验中用到的关节臂式坐标测量机 θ_6 的取值范围为 $124.38^\circ \sim -88.02^\circ$ 。在关节 5 为零位姿态即 $\theta_5 = 0^\circ$, 关节 6 为转动范围内的任意值时, 将关节 5 和 6 固定在一起, 读取点 P_3 的坐标值。然后保持关节 5 处于 $\theta_5 = 0^\circ$, 松动固定关节 6 的机械夹具, 慢慢转动关节 6, 并记录转动过程中 P_3 点的坐标值, 如图 5a 所示。然后保持其他关节的角度不变, 松动固定关节 5 的机械夹具, 将关节 5 绕坐标轴 Z_5 旋转 180° , 即 $\theta_5 = 180^\circ$, 固定关节 5 和 6, 然后再慢慢转动关节 6, 每转过一定角度固定关节 6, 并记录 P_4 点的坐标。如图 5b 所示。

根据 2 次记录的 P_3 和 P_4 点的坐标值, 利用最小

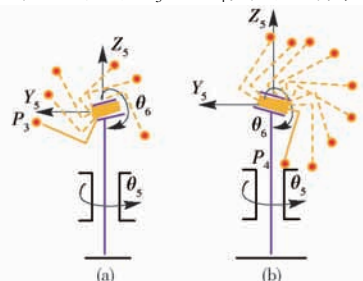


图 5 垂直度误差 $\Delta\alpha_5$ 的标定

Fig. 5 Calibration of perpendicularity error $\Delta\alpha_5$

二乘法分别拟合曲面方程,得到 2 个曲面方程的表达式,2 个曲面方程法向量的夹角即为垂直度误差 $\Delta\alpha_5$ 。

3.3 垂直度误差 $\Delta\alpha_4$ 的标定

垂直度误差 $\Delta\alpha_4$ 的标定是利用关节臂在不同位姿组合得到的方程组,然后进行求解得到的。为了方便测量,取关节 1 和关节 2 的转角分别为 0° 和 90° ,即 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ$,同时在 $\theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$ 的姿态下,将关节臂式坐标测量机的各关节固定在一起,如图 6a 所示,读取测头端 P_5 的坐标值。保持关节 1、2、4、5、6 的角度不变,将关节 3 旋转 180° ,即得到 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ, \theta_3 = 180^\circ$ 的姿态。再保持关节 1、2、3、4 和 6 的角度不变,将关节 5 旋转 180° ,即在 $\theta_1 = \theta_4 = \theta_6 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = \theta_5 = 180^\circ$ 的姿态下将关节臂式坐标测量机的各关节固定,如图 6b 所示,读取测头端 P_6 的坐标值。 P_5 点相对于 P_6 点在 Y 坐标的变化记为 ΔP_{56Y} ,由图可得到

$$\Delta\alpha_4 = \Delta P_{56Y} / [2(b_5 + b_7)] - \Delta\alpha_5 \quad (5)$$

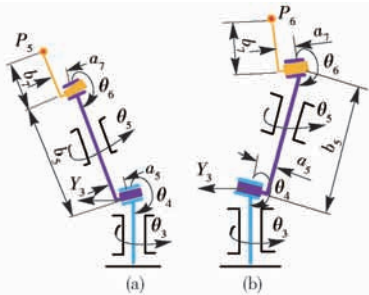


图 6 垂直度误差 $\Delta\alpha_4$ 的标定

Fig. 6 Calibration of perpendicularity error $\Delta\alpha_4$

3.4 垂直度误差 $\Delta\alpha_3$ 的标定

垂直度误差 $\Delta\alpha_3$ 的标定方法类似于垂直度误差 $\Delta\alpha_5$ 的标定,借助 2 个曲面法向量的夹角进行求解。 θ_4 的取值范围为 $72.54^\circ \sim -70.92^\circ$,在关节 3 为零位姿态即 $\theta_3 = 0^\circ$,关节 4 为取值范围内的任意角度时,将关节 3、4 固定在一起,同时在关节 5、6 均处于零位,即 $\theta_6 = \theta_5 = 0^\circ$ 时,将关节 5、6 固定在一起,读取该姿态下 P_7 点的坐标值,然后保持 $\theta_3 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$,松动固定关节 4 的机械夹具,慢慢转动关节 4,并记录转动过程中 P_7 点的坐标值,如图 7a 所示。然后保持其他关节的角度不变,松动固定关节 3 的机械夹具,将关节 3 旋转 180° ,即 $\theta_3 = 180^\circ$,将各关节固定,然后再次慢慢转动关节 4,每转过一定角度固定关节 4,并记录 P_8 点的坐标,如图 7b 所示。根据 2 次记录的 P_7 和 P_8 点的坐标值,分别利用最小二乘法拟合曲面方程,2 个曲面方程法向量的夹角即为垂直度误差 $\Delta\alpha_3$ 。

3.5 垂直度误差 $\Delta\alpha_2$ 的标定

要计算垂直度误差 $\Delta\alpha_2$,首先在关节臂式坐标

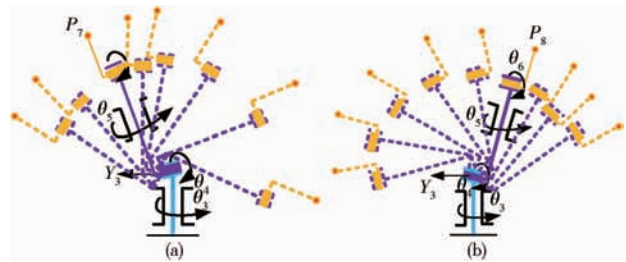


图 7 垂直度误差 $\Delta\alpha_3$ 的标定

Fig. 7 Calibration of perpendicularity error $\Delta\alpha_3$

测量机的关节 1~6 均为零位,即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$ 时,将各关节固定,如图 8a 所示,记录此时测头点 P_9 的坐标。然后保持关节 2~6 处于零位不变,即 $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$,将关节 1 旋转 180° 使 $\theta_1 = 180^\circ$ 。再在此基础上保持关节 1~4、6 的转角不变,即 $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_6 = 0^\circ, \theta_1 = 180^\circ$,将关节 5 转动 180° ,然后固定各个关节,如图 8b 所示,记录测头点 P_{10} 的坐标。 P_9 坐标相对于 P_{10} 坐标在 Y 坐标的变化记为 ΔP_{910Y} ,由此可得垂直度误差 $\Delta\alpha_2$ 的表达式

$$\Delta\alpha_2 = \Delta P_{910Y} / [2(b_3 + b_5 + b_7)] - \Delta\alpha_4 - \Delta\alpha_6 \quad (6)$$

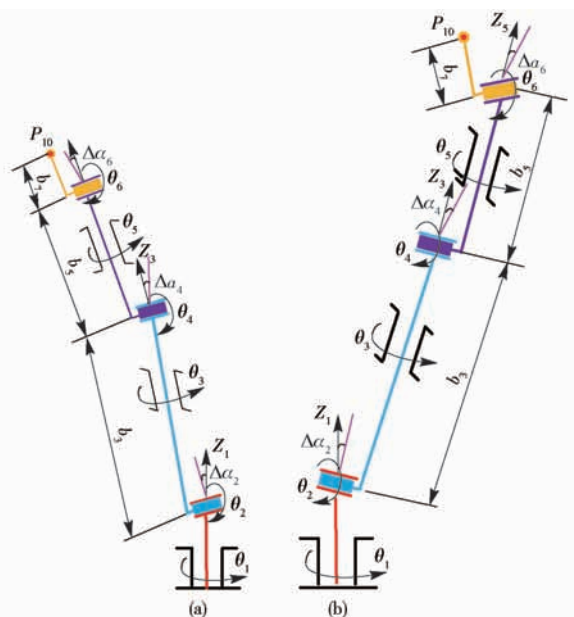


图 8 垂直度误差 $\Delta\alpha_2$ 的标定

Fig. 8 Calibration of perpendicularity error $\Delta\alpha_2$

3.6 垂直度误差 $\Delta\alpha_1$ 的标定

垂直度误差 $\Delta\alpha_1$ 的标定方法类似于 $\Delta\alpha_3$ 和 $\Delta\alpha_5$ 的标定,利用的方法是借助 2 个曲面法向量的夹角,此处仅给出 $\Delta\alpha_1$ 的原理分析。在关节 1 为零位姿态,关节 2 为 90° ,关节 3~6 为零位姿态,即 $\theta_1 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ$ 时,将关节臂式坐标测量机 1~6 关节固定。 θ_2 的取值范围为 $46.8^\circ \sim -71.46^\circ$,松动固定关节 2 的机械夹具,保持关节 3~6 固定,慢慢转动关节 2,使 θ_2 的角度在其取值范围内变化,并记录转动过程中 P_{11} 点的坐标值。然

后保持其他关节的角度不变,松动固定关节1的机械夹具,将关节1旋转 180° ,即 $\theta_1 = 180^\circ$,固定关节1。然后再次慢慢转动关节2,每转过一定角度固定关节2,并记录 P_{12} 点的坐标。根据2次记录的 P_{11} 和 P_{12} 点的坐标值,分别拟合曲面方程,2个平面方程法向量的夹角即为垂直度误差 $\Delta\alpha_1$ 。

4 实验

在ROMER Infinite 2.0型关节臂式坐标测量机上,借助Brown & Sharpe Global Classic 9158正交式三标测量机进行实验,得到实验数据。

4.1 实验数据

通过对实验原理的分析得到,垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 、 $\Delta\alpha_4$ 、 $\Delta\alpha_2$ 的标定原理相同,垂直度误差 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_3$ 、 $\Delta\alpha_5$ 的标定原理相同,此处标定实验的实物图,仅以垂直度误差 $\Delta\alpha_6$ 为例, $\Delta\alpha_6$ 的标定实物图如图9。关节臂式坐标测量机臂长和偏置结构参数为已知参数, $b_7 = 176.484$ mm, $b_5 = 531.880$ mm, $b_3 = 747.489$ mm, $a_5 = 78.312$ mm, $a_7 = 25.962$ mm。

经过多次重复测量得到测量结果为 $L_{P_1P_2} = 30.863$ mm, $\Delta P_{56Y} = 90.319$ mm, $\Delta P_{910Y} = 436.756$ mm。

曲面法向量如表1所示。

$$T_i^{i+1} = \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \text{Trans}(Z_i, d_{i+1}) \text{Trans}(Y_i, b_{i+1}) \text{Trans}(X_i, a_{i+1}) \text{Rot}(X_i, \alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & \sin\theta_i \sin(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & a_{i+1} \cos\theta_i - b_{i+1} \sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & \cos\theta_i \sin(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & a_{i+1} \sin\theta_i + b_{i+1} \cos\theta_i \\ 0 & \sin(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & \cos(\alpha_{i+1} + \Delta\alpha_{i+1}) & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将修正后的矩阵变换公式(7)代入式(3)可得到新的运动学方程。为了验证标定实验结果的准确性,利用直径为15.8754 mm的标准球进行了实验。利用关节臂式坐标测量机测量标准球上的4个点的坐标,通过软件记录测量每个点时,关节臂的6个关节角度变量 $\theta_1 \sim \theta_6$ 的角度值,将读取的角度值和关节臂式坐标测量机的各结构参数分别代入理想的运动学方程(3)和新的运动学方程中,求解出点的坐标值,然后利用最小二乘法拟合出标准球直径。由运动学方程(3)得到的标准球直径为15.8145 mm,相对误差为

$$\delta_1 = \frac{|15.8145 - 15.8754|}{15.8754} \times 100\% = 0.384\%$$

由修正过的运动学方程得到的标准球直径为15.8397 mm,相对误差为

$$\delta_2 = \frac{|15.8397 - 15.8754|}{15.8754} \times 100\% = 0.225\%$$

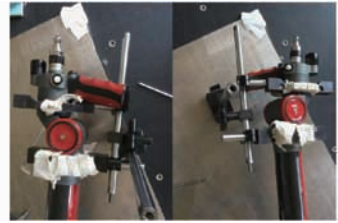


图9 $\Delta\alpha_6$ 的标定实物图

Fig.9 Calibration pictures of $\Delta\alpha_6$

表1 法向量值

Tab.1 Normal vector values

法向量曲面的点	i	j	k
P_3	0.873 0	-0.025 2	-0.273 0
P_4	-0.873 2	0.025 1	0.272 5
P_8	0.986 1	-0.253 8	-0.017 5
P_9	-0.985 3	0.253 2	0.016 9
P_{13}	-0.789 0	-0.345 1	0.001 5
P_{14}	-0.793 0	-0.345 5	0.001 0

垂直度误差最后计算结果为: $\Delta\alpha_1 = 0.0885^\circ$, $\Delta\alpha_2 = 0.0332^\circ$, $\Delta\alpha_3 = 0.0346^\circ$, $\Delta\alpha_4 = 0.0294^\circ$, $\Delta\alpha_5 = 0.0344^\circ$, $\Delta\alpha_6 = 0.0874^\circ$ 。

4.2 实验数据分析

公式(1)相邻矩阵间的变换关系,是在不考虑误差的情况下得出的。此处考虑垂直度误差,将公式(1)修正为

由实验结果得出,利用标定得到的垂直度误差的参数修正运动学方程后测量相对误差为0.225%,小于未修正时的相对误差0.384%。实验结果仍存在一定的误差,该误差可能是由于没有进行温度补偿、测量过程中的人为因素和机械夹具的自重等因素造成的。

5 结束语

通过分析关节臂式坐标测量机的结构与测量原理建立了它的测量模型。分析了现有的对角度量测量的研究方法的缺点,提出利用两点对称法对关节臂式坐标测量机的垂直度误差进行研究。设计了实验需求的机械夹具,通过标定实验,得出了各垂直度误差的角度值。并借助该标定结果对关节臂式坐标测量机的理想运动学方程进行了修正。通过测量标准球的实验证明,标定以后关节臂式坐标测量机的测量精度得到了提高。

参 考 文 献

- 1 赵磊,赵新华,王收军,等. 柔性测量臂的 RPY 建模与误差标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):365-371.
ZHAO Lei, ZHAO Xinhua, WANG Shoujun, et al. RPY modeling and error calibration of flexible measuring arm [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 365-371. (in Chinese)
- 2 汪平平,费业泰,尚平,等. 柔性坐标测量机参数辨识方法[J]. 农业机械学报,2007,38(7):129-132.
WANG Pingping, FEI Yetai, SHANG Ping, et al. Parameter identification method of flexible coordinate measuring machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7):129-132. (in Chinese)
- 3 ROTH Z S, MOORING B W, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. Information Technology Journal, 2004, 3(5): 377-385.
- 4 高贯斌,王文,林铿,等. 基于 RBF 神经网络的关节转角误差补偿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 20-24.
GAO Guanbin, WANG Wen, LIN Keng, et al. Error compensation of the joint angles based on RBF neural network [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 20-24. (in Chinese)
- 5 杨新刚,黄玉美,刘鸿雁,等. 圆光栅闭环反馈回转关节高精度补偿方法研究[J]. 中国机械工程, 2008,19(23):2782-2786.
YANG Xin'gang, HUANG Yumei, LIU Hongyan, et al. High precision compensation method of rotary joint with circular grating feedback[J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(23):2782-2786. (in Chinese)
- 6 王文,林铿,高贯斌,等. 关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):135-141.
WANG Wen, LIN Keng, GAO Guanbin, et al. Angle sensor eccentric parameter identification of articulated arm coordinate measuring machine[J]. Optics and Precision Engineering,2010, 18(1):135-141. (in Chinese)
- 7 胡鹏,金国光,隋修武,等. 六自由度柔性测量臂关节零位偏差标定算法研究[J]. 天津工业大学学报, 2013, 32(1): 75-78.
HU Peng, JIN Guoguang, SUI Xiuwu, et al. Research on zero position error calibration algorithm of six degree of freedom flexible measuring arm [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2013, 32(1): 75-78. (in Chinese)
- 8 王学影,王华,陆艺,等. 关节臂式坐标测量机参数标定方法[J]. 农业机械学报,2016,47(6):408-412.
WANG Xueying, WANG Hua, LU Yi, et al. Research on the parameter calibration method of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2016,47(6):408-412. (in Chinese)
- 9 程文涛,于连栋,费业泰. 关节式坐标测量机参数识别算法研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(1):45-49.
CHENG Wentao, YU Liandong, FEI Yetai. Research on parameter identification algorithm of joint coordinate measuring machine [J]. Journal of University of Science and Technology of China,2011, 41(1):45-49. (in Chinese)
- 10 裘祖荣,陈波,李杏华. 基于反转法的平行双关节坐标测量机的标定[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版, 2014, 47(6):512-517.
QIU Zurong, CHEN Bo, LI Xinghua. Calibration of parallel double joint coordinate measuring machine based on inversion method [J]. Journal of Tianjin University: Natural Science and Engineering Technology, 2014, 47(6):512-517. (in Chinese)
- 11 魏霖,王从军. 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.
WEI Lin, WANG Congjun. Coordinate transformation and parameter calibration of multi joint coordinate measuring machine[J]. Opto Electronic Engineering, 2007, 34(5):57-61. (in Chinese)
- 12 叶怀储,高贯斌,陈欢,等. 关节臂式坐标测量机的运动学建模与误差研究[J]. 计量学报, 2009, 30(5):27-31.
YE Huaichu, GAO Guanbin, CHEN Huan, et al. Kinematics modeling and error analysis of articulated arm coordinate measuring machine[J]. Acta Metrologica Sinica, 2009, 30(5):27-31. (in Chinese)
- 13 MUTILBA U, KORTABERRIA G, OLARRA A, et al. Performance calibration of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Procedia Engineering, 2013, 63(10):602-608.
- 14 ZHAO Shuang, ZHU Lianqing, CHEN Qingshan, et al. A kinematic parameter calibration method for articulated arm coordinate measuring machine[C]. Proceedings of SPIE, 2013, 8916:891611-891611-8.
- 15 王学影. 关节臂式坐标测量机系统研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
WANG Xueying. Research on the system of articulated arm coordinate measuring machine[D]. Tianjin:Tianjin University,2008. (in Chinese)