第39卷 第4期　　北京工业大学学报　　Vol. 39 No. 4
2013年4月　　JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY　　Apr. 2013

# 三维扫描测头的标定方法

张　白，石照耀
（北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京　100124）

摘　要：为降低三维扫描测头中标定方法对测量系统定位精度的要求，提出了一种三维扫描测头标定方法，设计了一种最小二乘迭代算法及迭代数据筛选算法，实现了三维扫描测头高精度高效率的标定。为验证该三维扫描测头标定方法的稳定性与精度，设计若干组标定仿真实验，测试各类误差对于三维扫描测头标定结果的影响。结果表明：该三维扫描测头标定方法对于三维扫描测头标定过程中定位精度没有要求，对于测量机误差及扫描测头探测误差不敏感，三维扫描测头坐标系单位向量精度达0.000 01，完全满足三维扫描测头标定要求。

关键词：扫描测头；标定；定位精度；数据筛选
中图分类号：TH 711　　文献标志码：A　　文章编号：0254-0037(2013)04-0481-06

# Three-dimensional Scanning Probe Calibration Method

ZHANG Bai，SHI Zhao-yao
(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China)

**Abstract:** This paper proposes a three-dimensional scanning probe calibration method to reduce the positioning accuracy requirements. A fast least squares iterative algorithm and an iterative data filtering algorithm are designed to achieve the highly precise and efficient calibration of the three-dimensional scanning probe. Several calibration simulation experiments are designed to verify its stability and accuracy，and the influences on calibration result from various errors are tested. Experimental results show that this three-dimensional scanning probe calibration method does not require the positioning accuracy of measuring machine，it is insensitive to the measuring machine error and scanning probe detection error，the accuracy of unit vector of coordinate system of three-dimentional scanning probe reaches 0.000 01，and the three-dimensional scanning probe calibration requirements are completely satisfied.

**Key words:** scanning probe; calibrattion; positioning accuracy; data filtering

测头传感器（简称测头）作为核心部件，在诸如三坐标测量机、齿轮测量中心等精密量仪中得到广泛应用。测头通常分为接触式测头与非接触式测头2类，其中接触式测头又分为机械式测头、触发测头和扫描测头[1]。

扫描测头也称线性测头或模拟量测头，测头输出量与测头偏移量成正比，其测量原理是测头测端在与被测工件接触后，连续测得测头在各位置的微小位移，测头的传感装置输出的信号与测端的微小偏移成正比，该信号与精密量仪的相应坐标值叠加便可得到被测工件上测量点的精确坐标。若不考虑测杆的变形，扫描测头是各向同性，故其精度常常高

收稿日期：2013-01-11.
基金项目：国家科技重大专项资助项目(2010ZX04014-091).
作者简介：张　白(1981—)，男，博士研究生，主要从事精密测试技术及仪器方面的研究，E-mail: zhangbai@emails.bjut.edu.cn.
通信作者：石照耀(1964—)，男，教育部长江学者特聘教授，博士生导师，主要从事精密测试技术及仪器、齿轮工程等方面的研究，E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn.

于触发式测头. 在三维扫描测头应用过程中，测量系统的测量值是由标尺测量值与测头读数组合构成，扫描测头自身形成一个微型的三坐标系统[2]，而机器的标尺系统给出机器当前的坐标值. 一个测量点的坐标值是机器标尺系统的大位移和测头系统的微位移的合成，如图 1 所示.

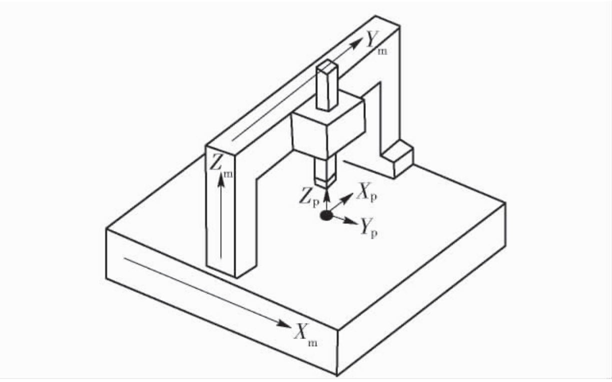


图 1　坐标测量机坐标系

Fig. 1　Coordinate system of CMM

图中 $X_m$、$Y_m$、$Z_m$ 为测量机机器坐标系轴线，$X_p$、$Y_p$、$Z_p$ 为三维扫描测头坐标系轴线. 由于测量机的机器坐标系（即标尺系统构成的坐标系）与三维扫描测头坐标系的相互关系未知，因此不能直接合成，只有通过测头标定[3-4]，才能确定测头坐标系与机器坐标系的转换关系，进而计算出真实测量点的坐标值. 相关文献提到的标定方法有 2 类[5]，一类是在同一点连续测量，以坐标测量机为例，测头沿着坐标测量机的 $X$ 轴、$Y$ 轴或 $Z$ 轴（即测量机的机器坐标系的各轴）单轴运动，直到三维扫描测头读数达到设定阈值. 通过 3 个轴分别在同一点上的测量，可计算出坐标测量机的机器坐标系各轴与三维扫描测头坐标系各轴之间的夹角，则可计算出坐标测量机的机器坐标系与三维扫描测头坐标系之间的变换矩阵，实现坐标测量机机器坐标系与三维扫描测头坐标系的统一. 此方法存在一个根本性的前提，即测头沿着坐标测量机机器坐标系单轴运动时必须测量同一个点，实际标定过程中无法保证这个前提，坐标测量机在单轴运动过程中，其他 2 轴存在微小运动量，同时在测量过程中测头与被测标准球存在一定滑动，必然造成一定的标定原理误差. 另一类标定方法的原理是测头在标准球的相同位置分别以不同探测方向测量 2 次，在标准球的空间分布（不在一条直线）上以同样方法测量 $n$（$n \geqslant 3$）个点，使用同一个点关联 2 次坐标测量机机器坐标系与三维扫描测头坐标系的测量值，通过解方程组的方式求出坐标测量机机器坐标系与三维扫描测头坐标系的变换矩阵，实现坐标测量机机器坐标系与三维扫描测头坐标系的统一. 此方法同样存在一个根本性的前提，即测头沿着不同的探测方向测量同一个点，实际坐标测量机存在一定的定位误差；同时测量中测头与标准球存在一定的滑动，造成 2 次测量不可能测量同一点，最终造成标定原理误差. 针对三维扫描测头标定的研究，国外对于正交三维扫描测头，提出的弦位法的扫描路径规划策略，其对测头扫描路径定位精度同样有一定的要求.

## 1　三维扫描测头标定方法

为解决现有三维扫描测头标定方法中存在的问题，提出了三维扫描测头标定新方法及其实现算法. 图 2 为三维扫描测头标定模型.

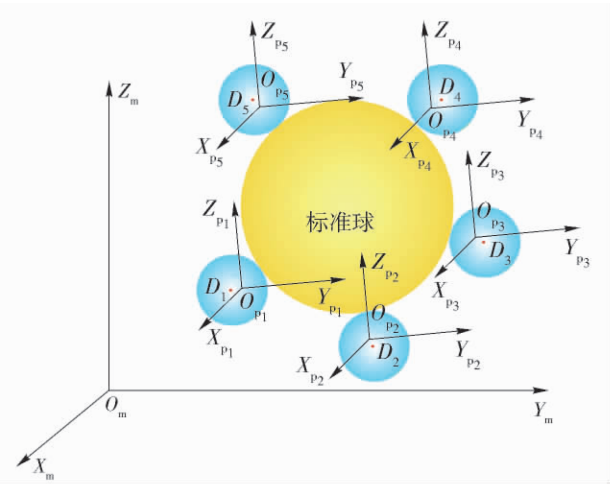


图 2　三维扫描测头标定示意图

Fig. 2　Sketch map of three-dimensional scanning probe calibration

图 2 中三坐标测量机的机器坐标系为 $\Sigma_m$，原点为 $O_m$，坐标轴 $X_m$、$Y_m$、$Z_m$ 分别与三坐标测量机 3 个运动方向平行，方向指向标尺计数的正方向.

$D_1$、$D_2$、$D_3$、$D_4$ 及 $D_5$ 表示测头球心位置，$O_{p1}$、$O_{p2}$、$O_{p3}$、$O_{p4}$ 及 $O_{p5}$ 表示三维扫描测头坐标系原点在机器坐标系下的坐标点，即在测量过程中，标尺系统读到的坐标值.

根据三坐标测量机的测量原理，标尺系统给出的坐标值是测头坐标系原点的坐标. 图 2 中点 $O_{p1}$ 是测端的中心点，实测点 $D_1$ 在测头坐标系中的坐标以 $[x_{p1}, y_{p1}, z_{p1}]^T$ 表示，在机器坐标系中的坐标以 $[x_{d1}, y_{d1}, z_{d1}]^T$ 表示，测头坐标系原点 $O_{p1}$ 在机器坐标系中的坐标表示为 $[x_{pm1}, y_{pm1}, z_{pm1}]^T$. 因 2 个坐标系

不统一，需要通过坐标系变换将测量点 $D_1$ 的坐标值转换到机器坐标系中. 引入坐标系变换矩阵 $A$ 后，$D_1$ 点在机器坐标系中的坐标转换为

$$\begin{bmatrix} x_{d1} \\ y_{d1} \\ z_{d1} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \begin{bmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \\ z_{p1} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $A$ 为测头坐标系到三坐标机器坐标系的变换矩阵，对于笛卡儿正交坐标系而言，在坐标系原点已知的情况下，一个笛卡儿正交坐标系可由 5 个参数决定，例如 $X$ 轴矢量可表示为 $(X_i, X_j, X_k)$，$Y$ 轴矢量可表示为 $(Y_i, Y_j, Y_k)$，$Z$ 轴可表示为 $(Z_i, Z_j, Z_k)$，则坐标系可由其 $X_i, X_j, X_k, Y_i, Y_j, Y_k, Z_i, Z_j, Z_k$ 中的 5 个参量表示，例如选择 $X_i, X_j, X_k, Y_i, Y_j$ 作为坐标系的 5 个参量. 三维扫描测头标定的目标就是获取三维扫描测头的测头坐标系各轴矢量在机器坐标系下的 $X_i, X_j, X_k, Y_i, Y_j$ 值及三维扫描测头的测球半径. 以三坐标测量机为例，在三坐标测量机坐标下，三维扫描测头坐标系中的各轴方向矢量是常量，唯一变化的是三维扫描测头坐标系原点坐标. 设三维扫描测头的测头坐标系的 $X$ 轴向量 $\boldsymbol{e}_{1p}$ 为 $(X_i, X_j, X_k)$，$Y$ 轴向量 $\boldsymbol{e}_{2p}$ 为 $\left(\frac{X_jY_j + X_kY_k}{-X_k}, Y_j, Y_k\right)$，$Z$ 轴向量 $\boldsymbol{e}_{3p}$ 为 $X$ 轴向量与 $Y$ 轴向量的矢量积，即 $\left(X_jY_k - Y_jX_k, -X_iY_k - X_jY_j - X_kY_k, X_iY_j + \frac{X_j(X_jY_j + X_kY_k)}{X_k}\right)$，设三坐标测量机的机器坐标系中 $X$ 轴方向矢量 $\boldsymbol{e}_1$ 为 $(1, 0, 0)$，$Y$ 轴方向矢量 $\boldsymbol{e}_2$ 为 $(0, 1, 0)$，$Z$ 轴方向矢量 $\boldsymbol{e}_3$ 为 $(0, 0, 1)$. 测头在 $D_1$ 点时，测头坐标系原点坐标表示为 $(x_{pm1}, y_{pm1}, z_{pm1})$，则变换矩阵 $A$ 为

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & x_{pm1} \\ \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & y_{pm1} \\ \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & z_{pm1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

$D_2$、$D_3$ 等其他测量点同样采用式(1)来计算，第 $i$ 个测量点的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} x_{di} \\ y_{di} \\ z_{di} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ z_{pi} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 $x_{di}$、$y_{di}$、$z_{di}$ 为经过坐标系变换后各测量点在三坐标测量机坐标系下的坐标值，第 $i$ 个测量点在测头坐标系中的坐标以 $[x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}]^T$ 表示，在三坐标测量机的机器坐标系中的坐标以 $[x_{di}, y_{di}, z_{di}]^T$ 表示. 式(3)中的 $A$ 为

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_1 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & x_{pmi} \\ \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_2 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & y_{pmi} \\ \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{1p} & \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{2p} & \boldsymbol{e}_3 \cdot \boldsymbol{e}_{3p} & z_{pmi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

第 $i$ 个测头坐标系原点 $O_{pi}$ 在机器坐标系中的坐标表示为 $[x_{pmi}, y_{pmi}, z_{pmi}]^T$，即第 $i$ 个测量点在三坐标测量机机器坐标系下的坐标读数.

通过式(3)，可将测量点的三维扫描测头坐标系下的坐标值变换到三坐标测量机的机器坐标系下，该表达式中只有变换矩阵 $A$ 为未知量，$A$ 中仅有 5 个未知数 $X_i$、$X_j$、$X_k$、$Y_j$、$Y_k$，使用最小二乘法来迭代计算 $A$ 中的 5 个未知数及测球半径 $r$. 使得迭代出的球度误差最小，即

$$\min \sum_{i=1}^{n} \left(\sqrt{(x_{di} - x_0)^2 + (y_{di} - y_0)^2 + (z_{di} - z_0)^2} - R - r\right)^2 \tag{5}$$

式中：$x_{di}$、$y_{di}$、$z_{di}$ 为经过坐标系变换后各测量点的坐标值；$x_0$、$y_0$、$z_0$ 为拟合球的球心坐标值；$R$ 为标准球的半径；$r$ 为测球半径.

对于带测头回转体的三维扫描测头，标定模型中仅需要考虑测头回转体在不同角度下相对于参考角度的坐标点平移量，经过坐标点平移后即可按照上述标定方法进行标定.

上述标定方法中，对于三维扫描测头标定中测量点的位置没有要求，降低了标定方法对于测量仪器的定位精度要求，同时，由于该三维扫描测头标定方法中只需要提供测量机标尺坐标系坐标值与三维扫描测头坐标系坐标值，只要标定过程中扫描测头与标准球接触，摩擦等原因造成测量点的滑动问题就不会对三维扫描测头标定造成影响.

## 2　扫描路径规划

三维扫描测头标定对与测头采样点及采样路径有一定要求，要求在测量过程中，三坐标测量机的 3

个轴都应参与运动. 通常可使三维扫描测头沿着标准球绕 $X$ 轴、$Y$ 轴、$Z$ 轴各测量一个圆(实际需要考虑测头与标准球支撑杆之间的干涉情况),对于测量不到的位置,可测量多半圆即可,三维扫描测头采样路径如图 3 所示.

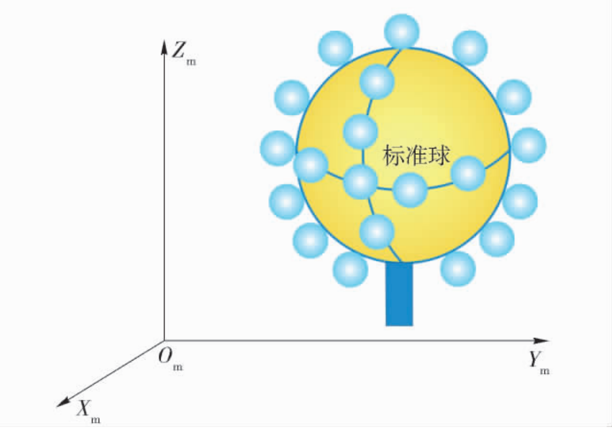


图 3 三维扫描测头标定路径规划示意图

Fig. 3 Calibration path of three-dimensional scanning probe

经过式(5)的最小二乘拟合算法,可计算出测头坐标系至三坐标测量机机器坐标系的变换矩阵 $A$ 及测球半径 $r$.

## 3 三维扫描测头数据筛选模型

该标定方法中涉及大量数据的球拟合以及球拟合的不断迭代,数据量增大后造成标定方法效率下降,为此需要设计相应的数据筛选方法. 首先,设计的采样路径中绕 $X$ 轴方向采集 $2N$ 个数据点,绕 $Y$ 轴方向采集 $2N$ 个数据点,绕 $Z$ 轴方向采集 $2N$ 个数据点; 其次,在标定计算过程中,使用的测量数据依次递增,第 1 次迭代过程中使用的测量点为 6 个,每个轴方向的圆上选择 2 个测量点,具体选择为第 1 个测量点与第 2 个测量点. 使用这 6 个测量点迭代出第 1 代三维扫描测头的测头坐标系,然后使用此次迭代出的坐标系变换矩阵作为初始变换矩阵,第 2 次迭代过程中使用的测量点为 12 个,从每个轴方向的圆上选择 4 个测量点,选择策略为第 1 个测量点、第 2 个测量点、第 3 个测量点、第 4 个测量点,即在上一次的基础上再增加 2 个测量点,第 $j$ 次迭代过程中使用的测量点为 $3\times2^j$ 个,从每个轴方向的圆上选择 $2^j$ 个测量点,选择策略为在上一次选择的测量点基础上增加 $2^{j-1}$ 个测量点,增加的点为第 $2^{j-1}+k$ 个点(其中 $k=1,2,\cdots,2^{j-1}$),依次递增. 每次迭代计算的初值都是上一次迭代计算的结果. 可通过此方法快速找到比较合适的初值参与标定计算,最终标定方法的效率将极大地提高而不损失精度.

## 4 三维扫描测头标定方法的实现

实现三维扫描测头标定的关键是坐标系变换后大量数据的球拟合,即一种多变化函数的寻优方法,为此需要找到快速高效的多变量最优化算法. 现有成熟的多变量寻优算法包括遗传算法、粒子群算法、单纯形算法等,其中单纯形法是由 Nelder 和 Mead 提出的一种多变量函数的寻优方法. 其优点是对目标函数的解析性没有要求,收敛速度快,适用面较广[6-9]. 但是单纯形法只是一种局部的搜索方法,其收敛点不能保证全局最优点. 遗传算法是扫描生物进化中“物竟天择”原则的计算智能方法,可有效地处理多变量和复杂函数关系的优化问题,具有全局优化能力,而且同时具有算法简单、收敛速度快、计算时间短等特点. 由于在进化过程中的“杂交”和“变异”算子,这种搜索策略有利于避免搜索过程陷入局部最优解,有利于提高求得全局最优解的可靠性. 但另一方面,应用表明,在优化问题中遗传算法对于局部收敛性问题并不具有优势. 为此,学者对于单纯性算法做了很多改进,在单纯性算法的基础上引入“变异”因子,使其既能发挥局部搜索能力强的特点,又能跳出局部收敛.

改进的单纯形法是在单纯形操作中引入遗传算法,以此来增强全局搜索能力. 具体做法是: 首先,进行基本单纯形法操作,快速得到局部极小值,再对极小值点在取值范围内进行遗传算法计算,在此极小值附近重新进行基本单纯性算法操作,直至得到最优解为止[10].

设迭代目标函数表示为 $f$,迭代的变量 $X_i$,$X_j$,$X_k$,$Y_i$,$Y_j$ 以向量 $\bar{X}=\{X_i,X_j,X_k,Y_i,Y_j\}$ 表示,迭代的变量增量 $\Delta X_i$,$\Delta X_j$,$\Delta X_k$,$\Delta Y_i$,$\Delta Y_j$ 以向量 $\bar{L}=\{\Delta X_i,\Delta X_j,\Delta X_k,\Delta Y_i,\Delta Y_j\}$ 表示,则改进单纯性算法流程描述如下:

1) 给定迭代初值 $\bar{X}_0$、初始步长 $\bar{L}$、最大迭代次数 $n_{\max}$、迭代计数器 $n=0$、最大变异次数 $m_{\max}$、变异计数器 $m=0$;

2) 进行基本单纯形运算,找到符合迭代目标的极值点 $\bar{X}_1$;

3) 以极值点 $\bar{X}_1$ 作为新的迭代初值 $\bar{X}_0$,给定相同的初始步长 $\bar{L}$,再进行基本单纯形运算,得到新的极值点 $\bar{X}_2$,计数器 $n=n+1$,如果 $n>n_{\max}$,则转至第 5);

4) $\bar{X}_1$ 对应的目标函数值计为 $f_1$,$\bar{X}_2$ 对应的目

标函数值计为 $f_2$，若 $f_1 \geqslant f_2$ 转至第 3），若 $f_1 < f_2$，则利用遗传算法对 $\overline{X}_1$ 进行变异，变异计数器 $m = m + 1$，如果 $m \leqslant m_{\max}$ 算法转至第 3），否则转第 5）；

5）输出 $\overline{X}_1$ 作为迭代结果.

## 5　方法验证

为验证该三维扫描测头标定方法，同时为了避免实验中测量仪器本身引入的测量误差，任意构造了一组测试数据，将三维扫描测头标定中主要的误差来源分别进行考虑，验证标定方法的可靠性与正确性（只是对扫描测头标定方法进行验证，测量机运动误差及垂直度等误差属于测量机自身误差，不考虑到标定方法中）. 无测量偏差的测试数据如表 1 所示.

表 1　实验 1 测试数据

Table 1　Testing data of experiment one

| 标准球半径/mm | 测球半径/mm | 触测量/mm | 测量机误差/μm |
|---|---|---|---|
| 25.000 | 5.000 | 0.050 | 0.0 |
| **测头误差/μm** | **标准球误差/μm** | **测头 $X$ 轴矢量** | **测头 $Y$ 轴矢量** |
| 0.0 | 0.0 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 962) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

采用球坐标系生成三维扫描测头验证数据，为方便数据生成，将标准球设置在三坐标测量机的坐标系原点位置，首先在 $X$ 轴方向测量最大圆，在此圆上等角度测量 128 个点；然后在 $Y$ 轴方向测量最大圆，在此圆上等角度测量 128 个点；最后在 $Z$ 轴方向测量最大圆，在此圆上等角度测量 128 个点，则完成完整球的测量，共测量 384 个测量点. 经过该三维扫描测头标定方法，对测试数据进行三维扫描测头标定，测头标定初值中测头半径给定为 5.000 mm，三维扫描测头坐标系 $X$ 轴矢量为(1,0,0)，$Y$ 轴矢量为(0,1,0)，标定结果如表 2 所示.

表 2　实验 1 标定结果

Table 2　Calibration results of experiment one

| 测球半径/mm | 测头 $X$ 轴矢量 | 测头 $Y$ 轴矢量 |
|---|---|---|
| 5.000 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 963) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 760) |

上述验证方案采用理论数据，坐标测量机、测头及标准球未加入误差，可验证该三维扫描测头标定方法的精度，为验证标定算法对误差的敏感性及算法的稳健性，对坐标测量机、测头及标准球加入随机误差后，实验方案如表 3 所示. 采用同样的测量数据生成方案，测头标定初值中测头半径给定为 5.000 mm，三维扫描测头坐标系 $X$ 轴矢量为(1,0,0)，$Y$ 轴矢量为(0,1,0)，经过三维扫描测头标定方法进行标定计算后，结果如表 4 所示.

表 3　实验 2 测试数据

Table 3　Testing data of experiment two

| 标准球半径/mm | 测球半径/mm | 触测量/mm | 测量机误差/μm |
|---|---|---|---|
| 25.000 | 5.000 | 0.050 | 2.0 |
| **测头误差/μm** | **标准球误差/μm** | **测头 $X$ 轴矢量** | **测头 $Y$ 轴矢量** |
| 0.0 | 0.0 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 962) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

表 4　实验 2 标定结果

Table 4　Calibration results of experiment two

| 测球半径/mm | 测头 $X$ 轴矢量 | 测头 $Y$ 轴矢量 |
|---|---|---|
| 5.000 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 961) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

改变对坐标测量机、测头及标准球加入随机误差后，实验方案如表 5 所示. 采用同样的测量数据生成方案，测头标定初值中测头半径给定为 5.000 mm，三维扫描测头坐标系 $X$ 轴矢量为(1,0,0)，$Y$ 轴矢量为(0,1,0)，经过三维扫描测头标定方法进行标定计算后，结果如表 6 所示.

表 5　实验 3 测试数据

Table 5　Testing data of experiment three

| 标准球半径/mm | 测球半径/mm | 触测量/mm | 测量机误差/μm |
|---|---|---|---|
| 25.000 | 5.000 | 0.050 | 2.0 |
| **测头误差/μm** | **标准球误差/μm** | **测头 $X$ 轴矢量** | **测头 $Y$ 轴矢量** |
| 2.0 | 0.0 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 962) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

表 6 实验 3 标定结果

Table 6 Calibration results of experiment three

| 测球半径/mm | 测头 $X$ 轴矢量 | 测头 $Y$ 轴矢量 |
|---|---|---|
| 5.000 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 961) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

改变对坐标测量机、测头及标准球加入随机误差后,实验方案如表 7 所示. 采用同样的测量数据生成方案,测头标定初值中测头半径给定为 5.000 mm,三维扫描测头坐标系 $X$ 轴矢量为(1,0,0),$Y$ 轴矢量为(0,1,0),经过三维扫描测头标定方法进行标定计算后,结果如表 8 所示.

表 7 实验 4 测试数据

Table 7 Testing data of experiment four

| 标准球半径/mm | 测球半径/mm | 触测量/mm | 测量机误差/μm |
|---|---|---|---|
| 25.000 | 5.000 | 0.050 | 2.0 |
| **测头误差/μm** | **标准球误差/μm** | **测头 $X$ 轴矢量** | **测头 $Y$ 轴矢量** |
| 2.0 | 2.0 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 962) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

表 8 实验 4 标定结果

Table 8 Calibration results of experiment four

| 测球半径/mm | 测头 $X$ 轴矢量 | 测头 $Y$ 轴矢量 |
|---|---|---|
| 5.000 | (0.998 062, 0.019 898, 0.058 961) | (−0.017 928, 0.999 269, −0.033 759) |

经过验证,该三维扫描测头标定方法对迭代初值要求较低,对坐标测量机及测头误差不敏感,在坐标测量机及测头误差均有较大误差的情况下仍可实现高精度的三维扫描测头标定.

## 6 结论

1) 经过实验验证,三维扫描测头标定方法高效可靠,标定方法对测量机的定位精度没有要求,避免了测量机的定位误差对扫描测头标定造成的影响.

2) 三维扫描测头标定方法对迭代初值要求较低,对坐标测量机及测头误差不敏感,在测量机及测头误差均有较大误差的情况下仍可实现高精度的扫描测头标定.

## 参考文献:

[1] 石照耀,韦志会. 精密测头技术的演变与发展趋势[J]. 工具技术,2007,41(2): 3-8.
SHI Zhao-yao, WEI Zhi-hui. Evolution and some trends in precision probe technology [J]. Tool Engineering, 2007, 41(2): 3-8. (in Chinese)

[2] 石照耀,张斌,林家春,等. 坐标测量技术半世纪——演变与趋势[J]. 北京工业大学学报,2011,37(5): 648-656.
SHI Zhao-yao, ZHANG Bin, LIN Jia-chun, et al. Half century of coordinate metrology technology—evolution and trends [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(5): 648-656. (in Chinese)

[3] WECKENMANN A, ESTLER T, PEGGS G, et al. Probing systems in dimensional metrology [J]. Annals of the CIRP, 2004, 53(2): 657-684.

[4] 孙涛,张龙江. 坐标测量机高精度测头技术[J]. 制造技术与机床,2001(10): 28-29.
SUN Tao, ZHANG Long-jiang. High-precision probe technology for CMM [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2001(10): 28-29. (in Chinese)

[5] 李明,费丽娜. 几何坐标测量技术及应用[M]. 北京: 中国标准出版社,2012: 12-210.

[6] 张美恋. 基于遗传算法和单纯形法的混合优化算法[J]. 集美大学学报: 自然科学版,2001,6(2): 106-110.
ZHANG Mei-lian. A hybrid optimizationbased on genetic algorithm and simplex method [J]. Journal of Jimei University: Natural Science Edition, 2001, 6(2): 106-110. (in Chinese)

[7] 李春风,许承权,蒲文利. 改进的单纯形法及其在非线性参数估计中的应用[J]. 海洋测绘,2009,29(6): 14-16.
LI Chun-feng, XU Cheng-quan, PU Wen-li. Improved simplex method for nonlinear least squares estimation [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(6): 14-16. (in Chinese)

[8] 王新洲. 非线性模型参数估计理论与应用[M]. 1 版. 武汉: 武汉大学出版社,2002: 4-35.

[9] 王新洲. 非线性模型参数估计的直接解法[J]. 武汉测绘科技大学学报,1999,24(1): 24-27.
WANG Xin-zhou. A direct solution method of parameter estimation of nonlinear model [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1999, 24(1): 24-27. (in Chinese)

[10] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防大学出版社,1999: 3-25.

(责任编辑 杨开英)