

激光测头的光束空间矢量标定方法

毕超,刘京亮,刘飞,吕来鹏,雷雯铭

(北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室,北京 100076)

摘要: 为了完成三维型面的高效扫描测量,将激光测头通过回转台安装在三坐标测量机 Z 轴的移动末端上,以搭建非接触式的光学坐标测量系统。在被测表面三维点云的创建过程中,需要将激光测头的一维距离值转化为测量点的三维坐标值,为此,提出了基于球面的光束空间矢量标定方法。在标定过程中,通过控制测量机 X、Y 和 Z 轴的运动实现测头的标定轨迹,使测头能够采集到球面上的若干测量点,同时记录下各轴的光栅尺读数和测头的输出。然后,应用这些数据和球面的约束方程来建立超定非线性方程组,并采用矩阵最小二乘法求解出测量光束所在直线的单位方向向量。最后,将一个直径已知的金属球作为被测对象,应用所搭建的测量系统在 10 个不同方位对其直径进行测量,所得结果的测量误差均小于 0.05 mm,充分说明了所提出的标定方法的有效性,从而为实现空间自由曲面的精密高效测量奠定了基础。

关键词: 激光测头; 光束空间矢量; 标定; 非接触

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3775-07

Calibration method of space vector of beam for point laser sensor

Bi Chao, Liu Jingliang, Liu Fei, Lv Laipeng, Lei Wenming

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing Technology, Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

Abstract: For the purpose of scanning and measuring 3D surfaces efficiently, a non-contact optical coordinate measuring system was established by installing a point laser sensor on the mobile terminal of Z axis of a CMM through a probe head. As a result of converting one dimensional distance values of the laser sensor to three dimensional coordinates of the measuring points on the surface, a calibration method of the space vector of laser beam based on a spherical surface was proposed. In the calibration procedure, the trajectory of the laser sensor can be completed by controlling the movement of X, Y and Z axes of the CMM and several measuring points on the spherical surface can be collected by the sensor, in which the outputs of the grating rulers and the sensor were all recorded. Based on the above and the constraint equation of the spherical surface, a set of over-determined nonlinear equations was set up and the matrix least square method was used to solve the unit direction vector of the laser beam. Finally, a sphere with known diameter was measured by the optical coordinate measuring system at 10 different directions. Through calculation, the measuring errors are all smaller than 0.05 mm, which manifests the effectiveness

收稿日期:2015-04-05; 修订日期:2015-05-03

基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题(2013ZX04011031)

作者简介:毕超(1987-),男,硕士,工程师,主要从事精密测试技术及仪器方面的研究。Email:773721278@qq.com

of the calibration method proposed in the paper and lays the foundation of measuring spatial free surfaces rapidly and accurately.

Key words: point laser sensor; space vector of beam; calibration; non-contact

0 引言

随着现代设计和制造技术的发展,越来越多的工业产品和零部件具有了复杂的型面结构,如航空发动机中的叶片等零件,其表面为三维自由曲面,而且不同截面的型线轮廓形状不尽相同,同时呈现为扭转上升状^[1]。如此复杂的外形给这类零件的加工和测量都带来了巨大的困难,而要制造出符合设计要求的型面特征,就需要对其进行精确测量,而且测量的精度直接决定着制造的精度^[2]。

在三维自由曲面的测量中,传统的坐标测量机存在着一些固有的不足之处。由于采用接触式测头,测量速度慢、效率低,易发生干涉效应,而且存在测头的半径补偿误差,这些因素使得测量机在空间曲面测量中的应用受到了很大限制^[3]。随着测量与检测技术的进步,越来越多的非接触式测量方法应用到了三维型面的精密测量中,如光学扫描法、视觉测量法等^[4]。由于光学扫描法的精度较高,而且能够快速获得被测表面的密集点云数据,因而成为自由曲面非接触式测量领域的研究热点。目前,国外已经出现了专用的测量仪器,如德国的 WENZEL 公司已经研发出了自动高速非接触式多轴测量系统 MAXOS 和光学高速多轴测量系统 CORE-DS,这两款测量设备均采用新一代的白光测头来取代传统的接触式测头,克服了接触式测头的不足,可以实现三维自由曲面的全自动高速扫描测量^[5-6]。然而,这种专用测量系统的价格非常昂贵。

为了打破国外的技术垄断,在国内的一些科研院所,已经开展了非接触式坐标测量系统的研制和开发工作,并取得了很大进展。在实际应用中,基于激光三角反射原理的光学测头,由于其具有成本低、精度高、光斑直径小等优点^[7-8],非常适用于对三维型面进行快速、精确的扫描测量。另外,三坐标测量机具有移动范围大、定位精确、通用性强等特点,可以用作激光测头的移动载体,通过各轴的移动来实

现激光测头的扫描轨迹,进而完成被测曲面三维点云的获取。因此,将激光测头和测量机相结合以搭建非接触式的光学坐标测量系统,可以充分发挥二者的优点,以满足逆向工程中对模型数字化的高精度、高效率的应用需求。

通常,激光测头被安装在测量机 Z 轴的移动末端上,以到达各个空间位置^[9]。然而,激光测头的输出为绝对距离值,要获得被测曲面的三维点云数据,还需要将测头的一维距离值转化为被测点的三维坐标值,这就需要通过标定来确定测头所发射出的测量光束的空间矢量,即确定光束所在直线的单位方向向量。在标定过程中,将高精度的球体固定在工作台上,由激光测头在球面上采集若干个测量点来建立方程组,以求解出测量光束的空间方位。由于球面具有各向同性的性质,因而无论测头方位如何,均可在同一个球面上完成标定。祝连庆等提出了一种基于标准球的光学测头的系统标定方法,将激光测头安装于关节臂测量机的末端,通过扫描陶瓷标准球来建立超定非线性方程组,并应用非线性最小二乘法求解出测头的方位参数^[10],但在实际操作过程中,迭代初值不易确定,并且迭代求解所需的时间较长。解则晓、房建国等将光学测头的激光束等效成接触式测头的测针,利用迭代法实现了激光束方向的标定^[11-12],但在标定过程中需要精确控制坐标测量机各轴的运动,以保证在每个测量点处的激光束的长度保持不变,较难操作。

文中搭建了基于三坐标测量机的非接触式测量平台,将激光测头通过回转台安装在测量机的 Z 轴上,并将用于标定的金属球固定在工作台上。针对测头的光束空间矢量标定问题,提出了基于球面的标定方法,并详细阐述了其数学原理。在标定过程中,测头随着测量机的 X、Y 和 Z 轴移动,根据各轴光栅尺的读数增量和激光束的长度值来建立超定非线性方程组,以确定激光束所在直线的方向向量。在解算未知量的过程中,采用了基于参数代换和矩阵最小

二乘法的求解方法,不仅提高了求解效率,而且回避了迭代初值的选取问题。实验结果表明:文中所提出的方法能够完成测头光束空间矢量的标定,使系统达到较高的测量精度,从而为实现三维型面的快速扫描测量奠定了基础。

1 标定原理

为了完成自由曲面的高效扫描测量,文中搭建了如图 1 所示的光学坐标测量系统,以坐标测量机为平台,将激光测头通过 PH10 回转台安装在测量机 Z 轴的移动末端上,并根据被测表面的法向分布调整测头的测量光束到适宜的方位。通过控制测量机各轴的运动带动激光测头完成扫描轨迹,可以实现对被测曲面的扫描测量,而 PH10 回转台可以改变测头的空间方位,从而使测量系统能够实现对被测物的全方位扫描,更具灵活性和通用性。

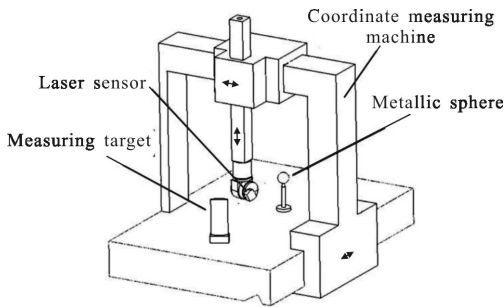


图 1 非接触式光学坐标测量系统

Fig.1 Non-contact optical coordinate measuring system

被测点的三维坐标的获取需要确定测头光束的空间矢量,这就要求通过标定来获得光束所在直线的单位方向向量。图 2 所示为标定算法的数学模型,在标定过程中,将表面经过研磨的金属球固定在光学坐标测量系统的工作台上,设球心为 O' ,半径为 R ,将其表面视为理想球面。以 O' 为坐标原点,建立坐标系 $O'-xyz$,其中, x 、 y 和 z 轴的方向和尺度分别与测量机坐标系 $O-XYZ$ 的 X 、 Y 和 Z 轴相同。因而, $O'-xyz$ 与 $O-XYZ$ 之间的转换关系仅为平移。在 $O', -xyz$ 中,球面方程可以表示为:

$$x^2+y^2+z^2=R^2 \tag{1}$$

初始时,激光测头位于“位置 1”,设测头的光束发射点 Q 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,光束的长度为 L ,且光束投射到球面上形成光点 P 。设光束所在直线的单

位方向向量为 (l, m, n) ,则 P 的坐标可以表示为 $(x_0-L \cdot l, y_0-L \cdot m, z_0-L \cdot n)$ 。由于 P 在球面上,因而其坐标满足球面方程,可以表示为:

$$(x_0-L \cdot l)^2+(y_0-L \cdot m)^2+(z_0-L \cdot n)^2=R^2 \tag{2}$$

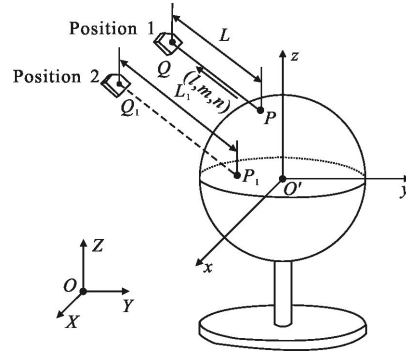


图 2 光束空间矢量的标定模型

Fig.2 Calibration model of the space vector of laser beam

控制测量机 X 、 Y 和 Z 轴的运动,使激光测头移动到下一个位置,即“位置 2”。此时激光发射点变为 Q_1 ,由于 $O-XYZ$ 与 $O'-xyz$ 的方向和尺度均相同,因而 Q_1 在 $O'-xyz$ 中的坐标可以表示为 $(x_0+\Delta x_1, y_0+\Delta y_1, z_0+\Delta z_1)$,其中, Δx_1 、 Δy_1 和 Δz_1 分别为各轴光栅尺的读数增量。此时,光束与球面的交点变为 P_1 ,光束的长度也变为 L_1 ,由于光束方向未变,则 P_1 在 $O'-xyz$ 中的坐标可以表示为 $(x_0+\Delta x_1-L_1 \cdot l, y_0+\Delta y_1-L_1 \cdot m, z_0+\Delta z_1-L_1 \cdot n)$,其坐标也满足球面的约束方程,如公式(3)所示。

$$(x_0+\Delta x_1-L_1 \cdot l)^2+(y_0+\Delta y_1-L_1 \cdot m)^2+(z_0+\Delta z_1-L_1 \cdot n)^2=R^2 \tag{3}$$

同理,在测量机的运动过程中,对 3 个轴的光栅尺读数和激光测头的输出进行 $N(N \geq 6)$ 次同步采集,可以获得 N 个球面上的点 P_1, P_2, \dots, P_N 的坐标。将各个点的坐标带入到球面方程(1),连同公式(2),则可得到由 $N+1$ 个方程组成的方程组,如公式(4)所示。可以看出,公式(4)是一个超定的非线性方程组,其中, l, m, n, x_0, y_0 和 z_0 为未知量,其他参数可分别通过测量机的光栅尺读数以及激光测头的输出得到。对于公式(4)中 6 个未知量的解算,通常可以采用非线性最小二乘法进行迭代求解,但在求解过程中,一方面步骤繁琐,迭代初值不易选取;另一方面迭代过程所需的时间较长,不能满足高效测量的需求。因而,文中提出了一种采用参数代换和矩阵最小二乘法的求解方法,可以快速获得未知参数的数值。

具体求解步骤如下。

首先,对公式(4)进行化简,为此,将公式(4)中的第 2~N+1 个方程分别与第 1 个方程做减法,以消去右端项 R^2 ,同时,设 $k=x_0 \cdot l+y_0 \cdot m+z_0 \cdot n$ 。由于在标定过程中,激光束的方向和金属球的位置都未发

生变化,因而 x_0, l, y_0, m, z_0 和 n 的值都恒定,则 k 为未知常数,可用 k 来代换 $x_0 \cdot l+y_0 \cdot m+z_0 \cdot n$ 。另外,由于 (l, m, n) 为光束所在直线的单位方向向量,因而 $l^2+m^2+n^2=1$ 。基于上述分析,对公式(4)进行化简,结果如公式(5)所示。

$$\begin{cases} (x_0-L \cdot l)^2+(y_0-L \cdot m)^2+(z_0-L \cdot n)^2=R^2 \\ (x_0+\Delta x_1-L_1 \cdot l)^2+(y_0+\Delta y_1-L_1 \cdot m)^2+(z_0+\Delta z_1-L_1 \cdot n)^2=R^2 \\ (x_0+\Delta x_2-L_2 \cdot l)^2+(y_0+\Delta y_2-L_2 \cdot m)^2+(z_0+\Delta z_2-L_2 \cdot n)^2=R^2 \\ \vdots \\ (x_0+\Delta x_N-L_N \cdot l)^2+(y_0+\Delta y_N-L_N \cdot m)^2+(z_0+\Delta z_N-L_N \cdot n)^2=R^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta x_1 \cdot x_0+2 \cdot \Delta y_1 \cdot y_0+2 \cdot \Delta z_1 \cdot z_0-2 \cdot L_1 \cdot \Delta x_1 \cdot l-2 \cdot L_1 \cdot \Delta y_1 \cdot m-2 \cdot L_1 \cdot \Delta z_1 \cdot n=-\left(\Delta x_1^2+\Delta y_1^2+\Delta z_1^2+L_1^2-L^2\right)+2 \cdot\left(L_1-L\right) \cdot k \\ 2 \cdot \Delta x_2 \cdot x_0+2 \cdot \Delta y_2 \cdot y_0+2 \cdot \Delta z_2 \cdot z_0-2 \cdot L_2 \cdot \Delta x_2 \cdot l-2 \cdot L_2 \cdot \Delta y_2 \cdot m-2 \cdot L_2 \cdot \Delta z_2 \cdot n=-\left(\Delta x_2^2+\Delta y_2^2+\Delta z_2^2+L_2^2-L^2\right)+2 \cdot\left(L_2-L\right) \cdot k \\ \vdots \\ 2 \cdot \Delta x_N \cdot x_0+2 \cdot \Delta y_N \cdot y_0+2 \cdot \Delta z_N \cdot z_0-2 \cdot L_N \cdot \Delta x_N \cdot l-2 \cdot L_N \cdot \Delta y_N \cdot m-2 \cdot L_N \cdot \Delta z_N \cdot n=-\left(\Delta x_N^2+\Delta y_N^2+\Delta z_N^2+L_N^2-L^2\right)+2 \cdot\left(L_N-L\right) \cdot k \end{cases} \quad (5)$$

为了表达方便,将公式(5)转化为矩阵形式,如公式(6)所示。

$$A \cdot X=B+C \cdot k \quad (6)$$

式中:

$A=$

$$\begin{bmatrix} 2 \cdot \Delta x_1 & 2 \cdot \Delta y_1 & 2 \cdot \Delta z_1 & -2 \cdot L_1 \Delta x_1 & -2 \cdot L_1 \Delta y_1 & -2 \cdot L_1 \Delta z_1 \\ 2 \cdot \Delta x_2 & 2 \cdot \Delta y_2 & 2 \cdot \Delta z_2 & -2 \cdot L_2 \Delta x_2 & -2 \cdot L_2 \Delta y_2 & -2 \cdot L_2 \Delta z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2 \cdot \Delta x_N & 2 \cdot \Delta y_N & 2 \cdot \Delta z_N & -2 \cdot L_N \Delta x_N & -2 \cdot L_N \Delta y_N & -2 \cdot L_N \Delta z_N \end{bmatrix}_{N \times 6}$$

$$X=\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix}_{6 \times 1}; B=\begin{bmatrix} -\left(\Delta x_1^2+\Delta y_1^2+\Delta z_1^2+L_1^2-L^2\right) \\ -\left(\Delta x_2^2+\Delta y_2^2+\Delta z_2^2+L_2^2-L^2\right) \\ \vdots \\ -\left(\Delta x_N^2+\Delta y_N^2+\Delta z_N^2+L_N^2-L^2\right) \end{bmatrix}_{N \times 1};$$

$$C=\begin{bmatrix} 2 \cdot\left(L_1-L\right) \\ 2 \cdot\left(L_2-L\right) \\ \vdots \\ 2 \cdot\left(L_N-L\right) \end{bmatrix}_{N \times 1} \circ$$

根据矩阵最小二乘法,可知:

$$X=\left(A^T \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T \cdot B+\left(A^T \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T \cdot C \cdot k \quad (7)$$

通过公式(7)可以分别得到 x_0, l, y_0, m, z_0 和 n 关于 k 的表达式,将它们带入 $k=x_0 \cdot l+y_0 \cdot m+z_0 \cdot n$ 中,即可得到关于 k 的一元二次方程,进而可以解算出 k 的值。然后,将 k 返带回相应的表达式就可求解出 x_0, l, y_0, m, z_0, n 的值,从而完成了激光束的空间矢量

标定,并得到点 Q 的坐标。通过激光束的方向向量 (l, m, n) 、光束长度 L 以及光束发射点 Q 的坐标 (x_0, y_0, z_0) ,就可以获得测量点在 $O'-xyz$ 中的坐标,再通过 $O'-xyz$ 与 $O-XYZ$ 之间的转换关系,即可得到测量点在测量机坐标系下的三维坐标,以进行后续处理。

2 系统组成

文中选用中航工业精密所生产的 Pearl 1298 型坐标测量机为平台。该型测量机采用桥式移动结构,轻便高效, X, Y 和 Z 轴均采用天然花岗岩,行程分别为 1 200 mm、900 mm 和 800 mm,并配有高分辨率的光栅检测系统,定位精度为 3 μm 。另外,为了使测量系统更具灵活性,选用英国雷尼绍公司的 PH10 回转台,以完成测头空间方位的调整。PH10 回转台是由步进马达驱动的精密切分度系统,具有两个垂直相交的回转轴,水平轴为 A 轴,可转动的范围为 $0^\circ \sim 105^\circ$;垂直轴为 B 轴,可转动的范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$,角度最小分度值为 7.5° ,共有 673 个位置状态,具有很高的重复定位精度^[13]。

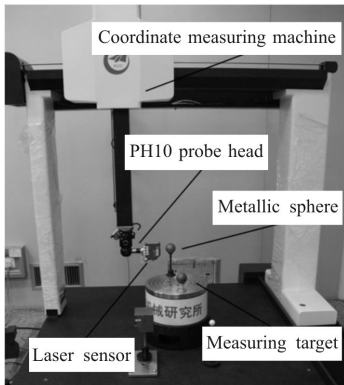
激光测头选用米铱(北京)测试技术有限公司的 optoNCDT 1700-20 激光位移传感器,该型传感器基于激光三角反射原理,控制器与传感器集成于一体,可以从较远距离对被测物体进行测量,其测量光束为 670 nm 的红色激光,光斑直径为 45 μm ,测量范围为 20 mm,分辨率(2.5 kHz,无平均)为 1.5 μm ,全量

程线性度小于±0.08%。

3 标定步骤

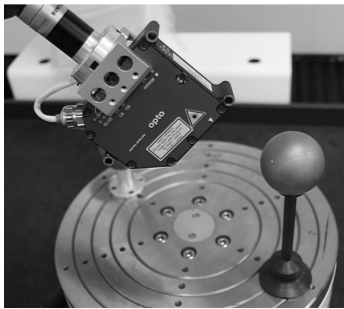
标定步骤如下:

(1) 将被测物体放置于工作台上, 通过控制 PH10 回转台调节激光测头到适宜的方位, 确保测量光束与被测曲面的法线方向平行或近似平行, 并将用于标定的金属球固定在测量机的工作台上, 如图 3 所示。



(a) 光学坐标测量系统

(a) Optical coordinate measuring system



(b) 激光测头与金属球

(b) Laser sensor and metallic sphere

图 3 实验现场

Fig.3 Experiments scene

(2) 开始标定测头光束的空间方位, 控制测量机各轴的运动, 使激光测头与金属球之间的距离在测头的测量范围之内, 记录下此时 3 个轴的光栅尺读数(X_0, Y_0, Z_0)和激光束的长度 L ;

(3) 规划标定过程的运动轨迹, 为了使标定结果更加精确, 此运动轨迹应包含 3 条以上的空间直线; 控制测量机使测头沿规划轨迹运动, 同时采集各轴的光栅尺读数(X_i, Y_i, Z_i)和相应的测头输出 L_i , 计算

每个测量点的光栅尺读数增量 $\Delta x_i=X_i-X_0, \Delta y_i=Y_i-Y_0, \Delta z_i=Z_i-Z_0$, 并将这些数值带入到公式(7)中进行 x_0, l, y_0, m, z_0 和 n 的矩阵最小二乘求解;

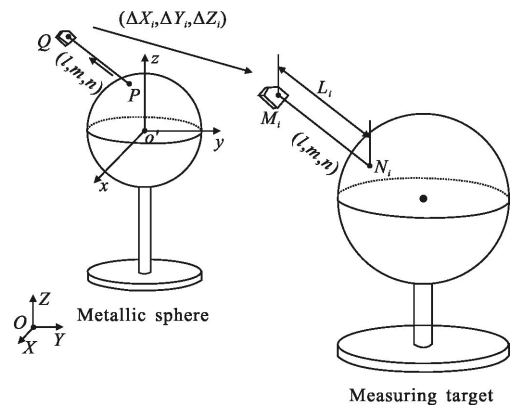
(4) 将 x_0, l, y_0, m, z_0 和 n 的最小二乘表达式带入 $k=x_0 \cdot l+y_0 \cdot m+z_0 \cdot n$, 得到只含有 k 的方程, 计算出 k 的值, 进而可以求解出激光束所在直线的单位方向向量(l, m, n), 完成激光测头的标定;

(5) 根据标定结果, 应用经过标定的测头采集被测物体表面的点云数据, 并转化到测量机坐标系 $O-XYZ$ 下, 进行后续处理。

4 实验过程

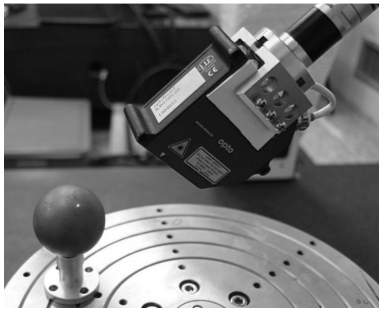
为了验证所提出的光束空间矢量标定方法, 应选择一个空间自由曲面作为被测对象, 并应用所搭建的非接触式光学坐标测量系统对其进行测量。但在实际操作过程中, 制造出符合设计要求的空间型面较为困难, 而且对于空间型面的评价体系尚未完善和成熟。因此, 文中选择一个直径 $d=50 \text{ mm}$ 的球作为被测目标, 用球面来模拟空间曲面的测量结果, 以验证所提出的方法的正确性和有效性, 测量过程如图 4 所示。

如图 4(a)所示, 首先, 在测量被测球面之前, 调整激光测头到所需的方位, 按照上文所述的标定方法和步骤, 对测量光束的空间矢量进行标定, 获得测头光束所在直线的单位方向向量(l, m, n)和激光发射点 Q 在 $O'-xyz$ 中的初始坐标(x_0, y_0, z_0), 并记录与点 Q 的初始坐标相对应的测量机各轴的光栅尺读数(X_0, Y_0, Z_0)。



(a) 过程示意图

(a) Schematic diagram



(b) 实验现场

(b) Experimental scene

图 4 测量被测球面

Fig.4 Measuring target sphere

然后,利用经过标定的测头扫描被测球面。要获得球面上点 $N_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 的空间坐标,就需要得到此时的激光发射点 M_i 的坐标。由于坐标系 $O'-xyz$ 与 $O-XYZ$ 的方向和尺度均相同,因而点 M_i 的坐标可以通过点 Q 的初始坐标 (x_0, y_0, z_0) 与测量机各轴的光栅尺读数增量计算得到,即 $(x_0+\Delta x_i, y_0+\Delta y_i, z_0+\Delta z_i)$, 其中 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 和 Δz_i 为各轴的光栅尺读数增量, $\Delta x_i=X_i-X_0, \Delta y_i=Y_i-Y_0, \Delta z_i=Z_i-Z_0$ 。因此,球面上 N_i 点的坐标即为 $(x_0+\Delta x_i-l \cdot L_i, y_0+\Delta y_i-m \cdot L_i, z_0+\Delta z_i-n \cdot L_i)$, L_i 为第 i 个测量点处的光束长度。

最后,调整激光测头在 10 不同方位分别扫描被测球,在每个方位取 30 个测量点,应用这些测量点分别进行球的最小二乘拟合,得到球的拟合直径 $d_i(i=1,2,\dots,10)$,并计算测量误差 $\delta_i=d_i-d$,如表 1 所示。

表 1 10 个不同方位的测量结果

Tab.1 Measuring results at 10 different orientations

No.	(l, m, n)	d_i/mm	δ_i/mm
1	(0.058 1, -0.634 4, 0.772 1)	50.032	0.032
2	(-0.448 3, 0.024 7, 0.895 2)	50.047	0.047
3	(-0.731 4, 0.672 3, 0.130 6)	49.983	-0.017
4	(0.005 9, 0.999 9, -0.008 3)	50.016	0.016
5	(-0.999 8, -0.009 3, 0.008 9)	50.021	0.021
6	(0.504 5, -0.009 4, -0.864 0)	49.958	-0.042
7	(-0.324 0, 0.774 5, 0.545 1)	49.976	-0.024
8	(0.523 1, 0.586 6, 0.612 0)	50.035	0.035
9	(0.005 8, -0.012 1, -0.999 0)	50.044	0.044
10	(0.312 9, -0.487 2, 0.815 2)	49.960	-0.040

从表 1 中可以看出:被测球拟合直径的平均值为 50.008 mm,标准差为 0.035 mm,而且各次测量误差均小于 0.05 mm。经过分析,测量误差产生的原因主要为:

(1) 三坐标测量机自身的误差,如 X, Y 和 Z 轴的直线运动部件的定位误差以及 PH10 回转台的回转误差等;

(2) 测头的测量误差,激光测头具有一定的倾斜角工作范围,而且激光束与测量点处的法线方向的夹角越大,测量误差越大;

(3) 激光测头处于某一方位进行球面点云的采集时,测量点只能分布在球面上的一部分区域,而不能覆盖整个球面,因而所得到的点云数据不能充分反映球面的整体情况。

综上所述,通过文中所提出的基于球面的光束空间矢量标定方法,可以有效地完成激光测头的外参数标定。从而将激光测头的一维长度值转化为测量点的三维坐标值,并实现各个方位上的测量功能,而且标定后的测头的测量精度能够满足逆向工程的使用要求。

5 结论

为了实现空间曲面的快速扫描测量,文中搭建了非接触式的光学坐标测量系统,将激光测头通过回转台安装在三坐标测量机的 Z 轴上,并提出了基于球面的激光束空间矢量标定法,以将测头的一维距离值转化为测量点的三维坐标值。在标定过程中,根据测量机各轴光栅尺的读数增量和激光束的长度建立超定非线性方程组,并应用参数代换和矩阵最小二乘法来求解未知变量,以得到激光束所在直线的方向向量,从而完成测量光束空间矢量的标定。最后,在不同方位上对尺寸参数已知的球面进行测量,测量误差均小于 0.05 mm,表明文中所提出的方法能够使激光测头在各个方位上实现测量功能,而且具备较高的测量精度,可以满足逆向工程的使用要求。

参考文献:

- [1] Wen Huaixing, Shang Yanyan, Li Xinbo. Reverse design and detection analysis of engine blade [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014, 7: 94-96. (in Chinese)

文怀兴, 上燕燕, 李新博. 发动机叶片的反求设计和检测

- 分析[J]. 机械设计与制造, 2014, 7: 94-96.
- [2] Rohit Mishra, Wilfried Grange, Martin Hegner. Rapid and reliable calibration of laser beam deflection system for microcantilever-based sensor setups [J]. *Journal of Sensors*, 2012: 1-6.
- [3] Zhang Wangxian, Zhong Sidong, Sui Libin, et al. Noncontact measurement of big dimension object based on coordinate measuring machine [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2004, 37(5): 112-115. (in Chinese)
张望先, 仲思东, 隋莉斌, 等. 基于三坐标测量机的大尺寸非接触测量[J]. 武汉大学学报, 2004, 37(5): 112-115.
- [4] Bi Chao, Zhang Yang, Liu Yong, et al. Image technology in dimension measurement of high temperature parts[J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2014, 35(5): 355-361.
- [5] Wang Miaoan. Application of optical probe in aircraft engine blade inspection[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 13: 32-35. (in Chinese)
王淼安. 光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 13: 32-35.
- [6] Wu Zhixin, Han Wei, Huang Wei. Research and application of non-contact measuring machine with white light in the blade detection[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 13: 48-51. (in Chinese)
吴志新, 韩巍, 黄伟. 非接触式白光测量机在叶片检测中的研究与应用[J]. 航空制造技术, 2014, 13: 48-51.
- [7] Zhao Shilei, Qu Xinghua, Xing Shujian, et al. Large-scale diameter automatic measuring system based on laser non-contact measuring principle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2185-2191. (in Chinese)
赵士磊, 曲兴华, 邢书剑, 等. 激光非接触式大尺寸内径自动测量系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2185-2191.
- [8] Shen Lei, Li Dinggen, Chu Jun, et al. Study on laser speckle correlation method applied in triangulation displacement measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 288-293. (in Chinese)
沈磊, 李顶根, 褚俊, 等. 激光三角法位移测量中数字散斑相关法的研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 288-293.
- [9] Liu Xiaojun. Theory and application of laser scanning probe in the flexible coordinate measuring machines [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
刘小军. 激光扫描测头在柔性三坐标测量机中的理论与应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [10] Zhu Lianqing, Lou Xiaoping, Guo Yangkuan, et al. System calibration method for measuring probe of coordinate measuring machine: China, 103697842A [P]. 2014-04-02. (in Chinese)
祝连庆, 娄小平, 郭阳宽, 等. 用于坐标测量机的测头的系统标定方法: 中国, 103697842A [P]. 2014-04-02.
- [11] Xie Zexiao, Zhang Guoxiong, Xu Yuchun, et al. Model and calibration of non-contact measuring system based on PH10 probe head [J]. *Journal of Tianjin University*, 2001, 34(6): 714-717. (in Chinese)
解则晓, 张国雄, 徐玉春, 等. 基于PH10回转体的非接触测量系统建模与标定[J]. 天津大学学报, 2001, 34(6): 714-717.
- [12] Fang Jianguo, Zhang Tan, Liu Yong, et al. Calibration method for the spatial vector of point laser sensor. China, 103528519A [P]. 2014-01-22. (in Chinese)
房建国, 张谭, 刘勇, 等. 一种点投射光学测头空间位置矢量的测量标定方法: 中国, 103528519A [P]. 2014-01-22.
- [13] Zhang Guoxiong. Coordinate Measuring Machine[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 132-136. (in Chinese)
张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 132-136.