

文章编号 1004-924X(2015)03-0678-08

## 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定

毕超\*, 房建国, 刘京亮, 刘勇, 李成玮

(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:** 搭建了非接触式的三坐标测量系统以便精密测量三维型面。将激光位移传感器通过具有两个回转轴的回转体安装在测量机的 Z 轴上, 从而可根据待测表面的形状来调整传感器的方位。为了使传感器在各个方位上实现测量功能, 提出了基于球形目标的光束方向标定方法, 并详细阐述了其数学原理。标定时, 驱动测量机使传感器分别沿测量机的 X、Y 和 Z 轴做等间距步进, 根据步长和激光束长度的变化建立方程组求解出激光束所在直线的单位方向向量。最后, 多次测量尺寸参数已知的六面体标准块规, 检验了该测量系统的重复性。结果显示, 该系统的测量不确定度为 0.048 mm; 测量另一直径已知的被测球时, 传感器在各个方位上的误差小于 0.05 mm, 表明所提出的标定方法使测量系统达到了逆向工程的使用要求。得到的数据表明, 本文所提出的方法有较高的标定精度和较好的重复性, 为实现三维型面的快速扫描测量奠定了基础。

**关键词:** 激光位移传感器; 光束方向; 非接触测量; 三维型面测量; 三坐标测量机; 标定

**中图分类号:** TN249; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0678

## Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target

BI Chao\*, FANG Jian-guo, LIU Jing-liang, LIU Yong, LI Cheng-wei

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

\* Corresponding author, E-mail: 773721278@qq.com

**Abstract:** A non-contact three coordinate measuring system was established to implement the measurement of 3D free-form surfaces accurately. A laser sensor was installed on the Z axis of a coordinate measuring machine via a probe head with two rotary axes, whose direction could be adjusted according to the shape of the measured surface. For the purpose of enabling the sensor to realize measurement functions in every orientations, a calibration method of laser beam direction based on a spherical target was proposed, and its principle was analyzed in detail. In the calibration procedure, the sensor moved in an equal distance along X, Y and Z axes and then equation sets were set up based on the bundle equations to compute the unit direction vector of the laser beam. Finally, a cube block with known dimensions was measured by the system to test the repeatability of the measuring system. The experimental result indicates that the measuring uncertainty of the system is 0.048 mm, which shows the good practicability of the calibration method. When the system was used

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-10-08.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2013ZX04011031)

to measure a sphere with a known diameter, the errors in every orientations are all smaller than 0.05 mm, which manifests that the calibration method proposed meets the requirements of reverse engineering. The method shows higher calibration precision and repeatability, and lays a basis for fast scanning of 3D free-form surfaces.

**Key words:** laser displacement sensor; laser beam direction; non-contact measurement; 3D free-form surface measurement; three Coordinate Measuring Machine(CMM); calibration

## 1 引言

随着航空航天等领域中高技术的发展,对叶片等复杂型面零件的高效、精密测量的需求日益迫切。在参与精密测量的众多种类的传感器中,非接触式的激光位移传感器能够实现三维型面的快速扫描测量,不仅效率高,而且不存在接触力,测量精度也很高。其中,基于激光三角反射原理的传感器尤其令人关注,因为具有精度高、成本低、安装方便等优点,它们在非接触测量领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。

为了实现非接触扫描测量,一般是将激光位移传感器引入测量系统并将其安装在测量设备的移动导轨上<sup>[2]</sup>。安装时,通常将激光位移传感器安装在坐标测量机或数控机床的Z轴上,通过X、Y轴的运动实现扫描轨迹,以使传感器到达各个测量位置,而Z轴的运动则用于使传感器适应物体表面的高度变化。在测量时,既要保证被测表面处于传感器的测量范围之内,又要保证测量光束与被测表面法线间的夹角 $\theta$ 处于传感器的许用倾斜角范围内。因而,当被测表面曲率较大时,需要通过回转机构来改变传感器的方位,确保 $\theta$ 在许用范围内,以便满足测量精度。不难看出,这样必须对传感器光束的空间方位进行标定才能完成后续的测量任务。出晓兰等搭建了一种附加于坐标测量机上的激光位移测头,并研究了基于图像处理理论的标定方法<sup>[3]</sup>。卢科青、周会成等提出了基于平面的激光束方向标定方法并进行了实验仿真,设计了多向标定块,标定后传感器沿任意方向的测量误差小于0.06 mm<sup>[4-5]</sup>。但该方法在标定过程中,需要在传感器改变方位的同时调整标定块的方位,而且在对一些复杂零部件进行测量时,效率低,不利于实现自动化测量。为了解决

上述问题,人们考虑了球面的各向同性。基于这一特性,无论传感器变换到何种方位,都可以在同一个球面上完成标定,因而基于球面的标定方法的实用性更强。解则晓等探索了基于球面的标定方法,将光学测头的激光束等效成接触式测头(测针),利用迭代法实现了激光束方向的标定<sup>[6-7]</sup>,不过该方法在标定过程中要求激光束的长度保持不变,较难控制。Bunimovich等搭建了激光扫描测量机,提出了基于非线性最小二乘法的光束方向标定方法<sup>[8]</sup>。

本文搭建了基于坐标测量机的非接触式测量平台,将激光位移传感器通过具有两个回转轴的回转体安装在测量机的Z轴上来实现传感器空间方位的调整,同时将用于标定的标准球固定在工作台上。针对传感器的光束方向标定问题,提出了基于球面的标定方法,并详细阐述了其数学原理。标定过程中,传感器随着测量机的X、Y和Z轴做等步长移动,根据步长和激光束长度的变化量建立方程组,以确定激光束所在直线的方向向量。该方法具有较高的标定精度,为实现三维型面的快速扫描测量奠定了基础。

## 2 数学模型及标定原理

在标定过程中,将半径为R的标准球固定在坐标测量机的工作台上,设球心为O,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的X、Y和Z轴相同,因而测量机的坐标系与 $O-xyz$ 之间的转换关系仅为平移。在 $O-xyz$ 中,球面方程表示为:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2. \quad (1)$$

将激光位移传感器通过回转体安装在测量机的 $z$ 轴上,并根据被测表面控制回转体的两个回

转轴,进而调整传感器的出射光束到适宜方位。图 1 所示为标定算法的数学模型,初始时传感器位于“位置 1”,所发出的激光束与球面的交点为 Q,光束长度为 L。

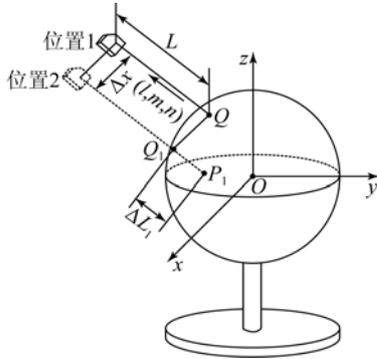


图 1 激光束方向标定的数学模型

Fig. 1 Mathematic model of calibration for laser beam direction

设激光束所在直线的单位方向向量为  $(l, m, n)$ , Q 在  $O-xyz$  中的坐标为  $(X_Q, Y_Q, Z_Q)$ 。由于 Q 在球面上,其坐标满足球面的约束方程(1),即:

$$X_Q^2 + Y_Q^2 + Z_Q^2 = R^2. \quad (2)$$

当传感器随测量机沿 X 轴移动  $\Delta x$  到“位置

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_1 \cdot l = -\Delta x^2 - \Delta L_1^2 + 2 \cdot \Delta L_1 \cdot K \\ 4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_2 \cdot l = -4 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_2^2 + 2 \cdot \Delta L_2 \cdot K \end{cases} \quad (5)$$

在上述方程组中,  $\Delta x, \Delta L_1$  和  $\Delta L_2$  均为已知量,而  $X_Q, l$  和  $K$  为未知量,则可以求解出  $X_Q$  和  $l$  关于  $K$  的表达式,即:  $X_Q = f_1(K)$  和  $l = g_1(K)$ 。

在此基础上,将传感器沿 Y 轴连续步进两次,步长均为  $\Delta y$ ,激光束的长度分别变为  $L + \Delta L_3$  和  $L + \Delta L_4$ 。记激光束与球面的交点分别为  $P_3$  和  $P_4$ ,其坐标分别为  $(X_Q + 2 \times \Delta x - l \times \Delta L_3, Y_Q + \Delta y - m \times \Delta L_3, Z_Q - n \times \Delta L_3)$  和  $(X_Q + 2 \times \Delta x - l \times \Delta L_4, Y_Q + 2 \times \Delta y - m \times \Delta L_4, Z_Q - n \times \Delta L_4)$ ,将它们带入球面方程(1)后,与式(2)相减,消去  $R^2$  并组成方程组,如式(6)所示。将  $X_Q = f_1(K)$  和  $l = g_1(K)$  带入方程组(6),可以将方程组(6)转化为  $Y_Q, m$  关于  $K$  的二元一次方程组,进而可求解出  $Y_Q, m$  关于  $K$  的表达式  $Y_Q =$

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta y \cdot Y_Q - 2 \cdot \Delta y \cdot \Delta L_3 \cdot m = -4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x^2 + 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_3 \cdot l - \Delta y^2 - \Delta L_3^2 + 2 \cdot \Delta L_3 \cdot K \\ 4 \cdot \Delta y \cdot Y_Q - 4 \cdot \Delta y \cdot \Delta L_4 \cdot m = -4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x^2 + 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_4 \cdot l - 4 \cdot \Delta y^2 - \Delta L_4^2 + 2 \cdot \Delta L_4 \cdot K \end{cases} \quad (6)$$

2”时, Q 随之移动到  $Q_1$ ,其在  $O-xyz$  中的坐标变为  $(X_Q + \Delta x, Y_Q, Z_Q)$ ,此时激光束与球面的交点为  $P_1$ ,光束长度变为  $L + \Delta L_1$ 。由于激光束的方向未变,则  $P_1$  在  $O-xyz$  中的坐标为  $(X_Q + \Delta x - l \times \Delta L_1, Y_Q - m \times \Delta L_1, Z_Q - n \times \Delta L_1)$ ,并满足球面的约束方程(1),即:

$$(X_Q + \Delta x - l \cdot \Delta L_1)^2 + (Y_Q - m \cdot \Delta L_1)^2 + (Z_Q - n \cdot \Delta L_1)^2 = R^2. \quad (3)$$

同理,传感器再沿 X 轴移动  $\Delta x$  时, Q 移动到  $Q_2, Q_1$  在  $O-xyz$  中的坐标变为  $(X_Q + 2 \times \Delta x, Y_Q, Z_Q)$ ,此时激光束与球面的交点为  $P_2$ ,光束长度为  $L + \Delta L_2$ ,则  $P_2$  在  $O-xyz$  中的坐标为  $(X_Q + 2 \times \Delta x - l \times \Delta L_2, Y_Q - m \times \Delta L_2, Z_Q - n \times \Delta L_2)$ ,其坐标满足方程(1),即:

$$(X_Q + 2 \cdot \Delta x - l \cdot \Delta L_2)^2 + (Y_Q - m \cdot \Delta L_2)^2 + (Z_Q - n \cdot \Delta L_2)^2 = R^2. \quad (4)$$

将式(3)和式(4)分别与式(2)相减后组成方程组。设  $K = l \times X_Q + m \times Y_Q + n \times Z_Q$ ,由于标定过程中激光束的方向和标准球的位置都未发生变化,因而  $l, X_Q, m, Y_Q, n$  和  $Z_Q$  的值都恒定,则  $K$  为未知常数。利用  $l^2 + m^2 + n^2 = 1$  和  $K$  对所得方程组进行化简得:

$f_2(K)$  和  $m = g_2(K)$ 。

在上述基础上,将传感器再沿 Z 轴连续步进两次,步长均为  $\Delta z$ ,光束长度分别变为  $L + \Delta L_5$  和  $L + \Delta L_6$ ,记激光束与球面上的交点分别为  $P_5$  和  $P_6$ ,其坐标分别为  $(X_Q + 2 \times \Delta x - l \times \Delta L_5, Y_Q + 2 \times \Delta y - m \times \Delta L_5, Z_Q + \Delta z - n \times \Delta L_5)$  和  $(X_Q + 2 \times \Delta x - l \times \Delta L_6, Y_Q + 2 \times \Delta y - m \times \Delta L_6, Z_Q + 2 \times \Delta z - n \times \Delta L_6)$ ,将它们带入球面方程(1)后,与式(2)相减,消去  $R^2$  并组成方程组,如式(7)所示。将  $X_Q = f_1(K), l = g_1(K), Y_Q = f_2(K)$  和  $m = g_2(K)$  带入方程组(7),则方程组(7)转化为  $Z_Q, n$  关于  $K$  的二元一次方程组,可求解出  $Z_Q, n$  关于  $K$  的表达式,即:  $Z_Q = f_3(K)$  和  $n = g_3(K)$ 。

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta z \cdot Z_Q - 2 \cdot \Delta z \cdot \Delta L_5 \cdot n = -4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x^2 + 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_5 \cdot l - 4 \cdot \Delta y \cdot Y_Q - \\ 4 \cdot \Delta y^2 + 4 \cdot \Delta y \cdot \Delta L_5 \cdot m - \Delta z^2 - \Delta L_5^2 + 2 \cdot \Delta L_5 \cdot K \\ 4 \cdot \Delta z \cdot Z_Q - 4 \cdot \Delta z \cdot \Delta L_6 \cdot n = -4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x^2 + 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_6 \cdot l - 4 \cdot \Delta y \cdot Y_Q - \\ 4 \cdot \Delta y^2 + 4 \cdot \Delta y \cdot \Delta L_6 \cdot m - 4 \cdot \Delta z^2 - \Delta L_6^2 + 2 \cdot \Delta L_6 \cdot K \end{cases} \quad (7)$$

此时,将  $X_Q, l, Y_Q, m, Z_Q, n$  关于  $K$  的表达式带入  $K = l \times X_Q + m \times Y_Q + n \times Z_Q$  中,即可得到:

$$K = g_1(K) \times f_1(K) + g_2(K) \times f_2(K) + g_3(K) \times f_3(K) \quad (8)$$

根据式(8)求解出  $K$ ,然后将  $K$  代入相应的表达式即可求解出  $X_Q, l, Y_Q, m, Z_Q$  和  $n$ ,从而完成了激光束的方向标定和  $Q$  点坐标的确定,进而可将激光位移传感器的一维长度值转换为空间点的三维坐标值。通过坐标转换将此坐标值转换到坐标测量机的坐标系中,就可以进行后续处理。

### 3 标定过程

#### 3.1 系统组成

本文选用北京航空精密机械研究所生产的 PEARL 1298 型三坐标测量机。该测量机采用工作台固定、龙门运动式结构,  $X, Y$  和  $Z$  轴均采用英国 Renishaw 公司的光栅检测系统,从而保证了测量时平稳、精确的运动,其测量精度为  $(2.8 + L/350) \mu\text{m}$ ,定位精度为  $3 \mu\text{m}$ ,  $X, Y$  和  $Z$  轴的行程分别为  $1\,200, 900$  和  $800 \text{ mm}$ 。

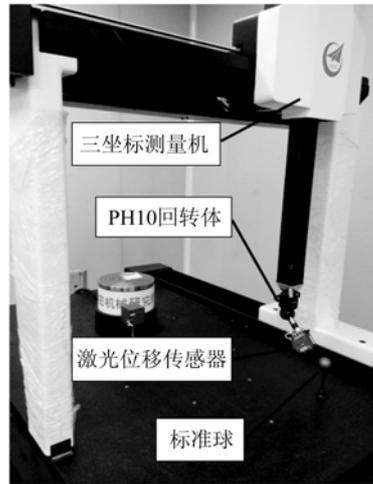
传感器采用德国米铍公司的 optoNCDT ILD 1700-20 系列激光位移传感器,其光源为  $670 \text{ nm}$  的半导体激光,测量起始距离为  $40 \text{ mm}$ ,测量范围为  $20 \text{ mm}$ ,分辨率为  $1.5 \mu\text{m}$ ,绝对误差小于  $16 \mu\text{m}$ 。

激光位移传感器通过英国 Renishaw 公司的 PH10 回转体安装在测量机的  $Z$  轴上,PH10 有  $A, B$  两个回转轴,回转角度分别为  $0 \sim 105^\circ$  和  $-180 \sim 180^\circ$ ,最小分度值为  $7.5^\circ$ 。  $A$  轴与  $B$  轴垂直相交,其交点为 PH10 的回转中心,而且  $B$  轴与测量机的  $Z$  轴同向。

#### 3.2 标定步骤

以 PEARL 1298 为测量平台,激光位移传感器的光束方向标定过程如下:

(1) 根据被测表面的法向分布,通过控制 PH10 回转体调节传感器到适宜的方位,并将用于标定的标准球放置在测量机的工作台上,如图 2 所示;



(a) 非接触式三坐标测量机

(a) Non-contact three Coordinate Measuring Machine(CMM)



(b) 激光位移传感器与标准球

(b) Laser sensor and standard sphere

图 2 实验现场

Fig. 2 Scene of experiments

(2) 控制测量机  $X, Y$  和  $Z$  轴的运动,使标准球处于传感器的测量范围之内,记录下此时 3 个轴的光栅尺读数  $(X_0, Y_0, Z_0)$  和激光束长度  $L$ ;

(3) 控制测量机使传感器沿  $X$  轴做等步长移动,每进给一个步长  $\Delta x$ ,测量系统采样一次,记录此时的激光束长度  $L_i$ ,并计算  $\Delta L_i = L_i - L$ 。为了提高测量精度,进行多次进给,进给次数为  $n(n > 2)$ ,则得到  $n$  组数据  $(\Delta L_i, \Delta x) (i = 1, 2,$

3, \dots, n), 此时所构成的方程组如式(9)所示。方程的个数大于待求未知量的个数, 需要应用最小

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_1 \cdot l = -\Delta x^2 - \Delta L_1^2 + 2 \cdot \Delta L_1 \cdot K \\ 4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_2 \cdot l = -4 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_2^2 + 2 \cdot \Delta L_2 \cdot K \\ 6 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 6 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_3 \cdot l = -9 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_3^2 + 2 \cdot \Delta L_3 \cdot K \\ \vdots \\ 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot \Delta L_n \cdot l = -n^2 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_n^2 + 2 \cdot \Delta L_n \cdot K \end{cases} \quad (9)$$

在上述方程组中,  $n, \Delta x, \Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_n$  都为已知量, 而  $X_Q, l$  和  $K$  为未知量, 为了方便求

二乘法以解算出  $X_Q, l$  关于  $K$  的最小二乘表达式, 即  $X_Q = \tilde{f}_1(K), l = \tilde{g}_1(K)$ 。

解, 可以将上述方程组拆分为两个方程组分别进行求解, 如下所示:

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_1 \cdot l = -\Delta x^2 - \Delta L_1^2 \\ 4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_2 \cdot l = -4 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_2^2 \\ 6 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 6 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_3 \cdot l = -9 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_3^2 \\ \vdots \\ 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot \Delta L_n \cdot l = -n^2 \cdot \Delta x^2 - \Delta L_n^2 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_1 \cdot l = 2 \cdot \Delta L_1 \cdot K \\ 4 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 4 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_2 \cdot l = 2 \cdot \Delta L_2 \cdot K \\ 6 \cdot \Delta x \cdot X_Q - 6 \cdot \Delta x \cdot \Delta L_3 \cdot l = 2 \cdot \Delta L_3 \cdot K \\ \vdots \\ 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot X_Q - 2 \cdot n \cdot \Delta x \cdot \Delta L_n \cdot l = 2 \cdot \Delta L_n \cdot K \end{cases} \quad (11)$$

在方程组(10)中, 右端项均为已知量, 因而可以根据最小二乘原理求得  $X_{Q1} = \tilde{f}_1, l_1 = \tilde{g}_1$ 。同理, 在方程组(11)中, 右端项为含  $K$  的代数式, 可以根据最小二乘原理求解出  $X_Q$  和  $l$  关于  $K$  的最小二乘表达式  $X_Q = \tilde{f}_2 \cdot K, l = \tilde{g}_2 \cdot K$ 。从而,  $X_Q = \tilde{f}_1(K) = X_{Q1} + X_Q = \tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 \cdot K, l = \tilde{g}_1(K) = l_1 + l_2 = \tilde{g}_1 + \tilde{g}_2 \cdot K$ 。

(4) 控制测量机使传感器沿  $Y$  轴做等步长移动, 同理进行采样。将  $X_Q = \tilde{f}_1(K), l = \tilde{g}_1(K)$  代入方程组(6), 可以解算得到  $Y_Q, m$  关于  $K$  的最小二乘表达式, 即:  $Y_Q = \tilde{f}_2(K), m = \tilde{g}_2(K)$ 。

(5) 同理, 使传感器沿  $Z$  轴做等步长移动并采样。将  $X_Q = \tilde{f}_1(K), l = \tilde{g}_1(K), Y_Q = \tilde{f}_2(K), m = \tilde{g}_2(K)$  代入方程组(7), 可以解算得到  $Z_Q, n$  关于  $K$  的最小二乘表达式, 即:  $Z_Q = \tilde{f}_3(K), n = \tilde{g}_3(K)$ 。

(6) 将  $X_Q, l, Y_Q, m, Z_Q$  和  $n$  的最小二乘表达式带入式(8), 得到只含有  $K$  的方程, 计算出  $K$  的值, 进而求解出激光束所在直线的单位方向向量  $(l, m, n)$ , 完成激光位移传感器的标定。

将经过标定的传感器用于测量叶片表面等复杂型面时, 要根据被测表面的实际情况对传感器进行多次转位, 并将每次转位时的测量结果通过

坐标系变换等拼接到同一坐标系下, 才能得到被测表面的完整点云数据。

在这个过程中, 首先要规划传感器方位和测量轨迹, 确定出测量整个复杂型面所需要的传感器的转位次数和方位; 其次, 标定所用到的传感器的每个方位, 确定传感器处于每个方位时激光束的方向向量, 并实时记录到数据采集系统中; 最后, 当测量过程中传感器转位到规划中的某个方位时, 即可调用数据采集系统中所记录的标定结果。由于所采用的 PH10 回转体能够保证较高的重复定位精度, 数据采集系统中记录的标定结果可以重复利用, 因此大大提高了测量效率。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 测量六面体标准块规

为了验证所提出的激光束方向标定方法的正确性并获得系统的测量不确定度, 将一个标称尺寸为 80.056 mm 的六面体标准块规作为被测目标, 应用所搭建的非接触式坐标测量系统分别测量块规的两个被侧面, 以获得两个被侧面的间距, 如图 3 所示。

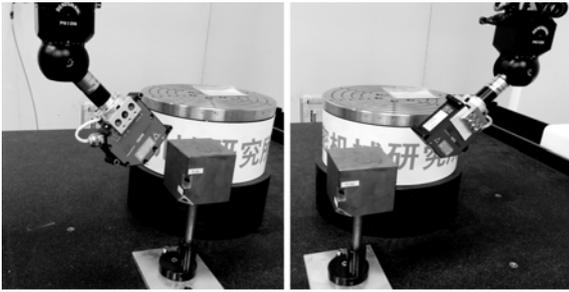


图3 测量六面体标准块规

Fig. 3 Measurement of cube block by non-contact CMM

在测量过程中,需要将激光位移传感器转换到两个不同的方位,以完成对两个测量面的扫描,因此,需要分别标定每个方位的光束方向,以获得被测面的三维点云。

按照上文所述的标定方法,设置传感器的采样频率为 30 Hz,测量机每个轴的步进数  $n=10$ ,步距为 2 mm。为保证采样点的精度,控制测量机以较慢的速度运动,进而获得激光束所在直线的单位方向向量  $(l, m, n)$  和初始点  $Q$  的坐标  $(X_Q, Y_Q, Z_Q)$ 。在实验过程中,步进数和步距要在综合考虑测量精度和设备性能等的基础上,经过多次实验对比后确定。步距太大,采集不到足够的点数;而步距太小,测量会受限于激光位移传感器自身的分辨率和精度。因而,在标定和测量过程中,当测量精度要求高时,要适当增加步进数和降低步距,以获得足够多的数据来进行后续处理;当传感器的分辨率和响应频率高时,也要适当增加步进数和降低步距,以提高测量效率和精度。

然后,利用经过标定的传感器测量六面体标准规的两个被测面,记录采集每个测量点时的光栅尺读数  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,其中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ,这样就得到了每个测量点相对于  $(X_0, Y_0, Z_0)$  的光栅尺读数的增量  $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$ ,其中  $\Delta X_i = X_i - X_0, \Delta Y_i = Y_i - Y_0, \Delta Z_i = Z_i - Z_0$ 。通过  $l, m, n$  就可以获得被测量面上测量点的坐标  $(X_Q + \Delta X_i - l \times \Delta L_i, Y_Q + \Delta Y_i - m \times \Delta L_i, Z_Q + \Delta Z_i - n \times \Delta L_i)$ ,其中  $\Delta L_i$  为第  $i$  个测量点的激光束长度相对于  $L$  的增量。

获得两个被测量面上的点云数据后进行平面拟合,得到两个被测面之间的距离。改变传感器的方位,使它在 10 组不同方位分别进行测量,所得

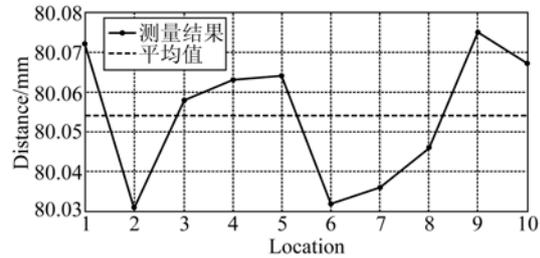


图4 测量结果

Fig. 4 Experimental results

结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看到,系统具有良好的重复性。通过计算,10 次测量结果的平均值为 80.054 mm,标准差为 0.016 mm。根据误差理论,测量不确定度为标准差的 3 倍,因而系统的测量不确定度为 0.048 mm。

#### 4.2 测量尺寸已知的球

为了进一步验证所提出的光束方向标定方法,将一个直径  $d=49.995$  mm 的球作为被测目标,应用所搭建的非接触测量系统对它进行测量,通过拟合获得其直径尺寸,如图 5 所示。

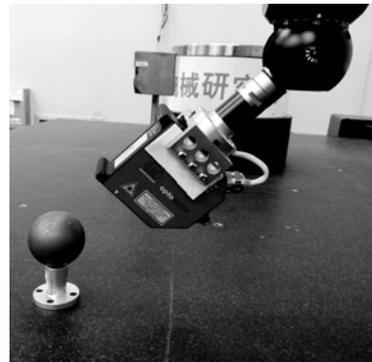


图5 测量被测球

Fig. 5 Measurement of target sphere by non-contact CMM

同理,首先标定光束方向,每个轴的步进数  $n=10$ ,步距为 2 mm,获得  $(l, m, n)$  和  $(X_Q, Y_Q, Z_Q)$ 。然后,利用标定后的传感器测量被测球,记录采集每个测量点时的光栅尺读数  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,其中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ,通过  $l, m, n$  获得被测球面上的测量点坐标  $(X_Q + \Delta X_i - l \times \Delta L_i, Y_Q + \Delta Y_i - m \times \Delta L_i, Z_Q + \Delta Z_i - n \times \Delta L_i)$ 。

调整激光位移传感器,在 10 不同方位分别测量被测球,在每个方位采集 50 个测量点。应用这些测量点分别进行球的最小二乘拟合,得到拟合直径  $d_j$  ( $j=1,2,\dots,10$ ),并计算测量误差  $\delta_j=d_j-d$ ,结果如表 1 所示。

表 1 标定和测量结果

Tab.1 Results of calibration and measurement

序号 $j$	$(l, m, n)$	$d_j/\text{mm}$	$\delta_j/\text{mm}$
1	(-0.815 8, -0.226 6, 0.522 4)	49.953	-0.042
2	(-0.267 0, 0.741 4, 0.607 1)	50.034	0.039
3	(0.580 7, 0.581 6, 0.583 2)	49.961	-0.034
4	(0.005 9, 0.716 1, -0.698 5)	49.963	-0.032
5	(-0.514 1, 0.012 8, -0.857 8)	49.970	-0.025
6	(0.504 5, -0.009 4, -0.864 0)	50.018	0.023
7	(-0.701 2, 0.714 0, 0.014 0)	49.957	-0.038
8	(-0.713 4, -0.701 3, 0.011 8)	49.965	-0.030
9	(0.005 6, -0.011 3, -0.999 9)	50.014	0.019
10	(-0.008 9, -0.999 9, 0.008 2)	50.018	0.023

从表 1 中可以看出,当传感器在不同方位测量被测球时,所得到的拟合直径与真实直径的误差均小于 0.05 mm,验证了本文所提出的标定方法的正确性和有效性。在上述实验过程中,球面上每个测量点的三维坐标值都会受到多种因素的影响,如测量机本身的行程和定位误差、PH10 回转体的回转误差以及激光位移传感器的测量误差等,这些误差都会反映到测量结果中。因此,应用

所获得的点云数据来进行球面的最小二乘拟合时,所得到的拟合直径与真实直径之间的误差应是这些误差综合作用的结果。

实验结果表明,经过标定后的系统可以将传感器的一维长度值转化为测量点的三维坐标值,从而获得被测表面的点云数据。同时,当激光位移传感器处于不同方位时,通过本文所提出的基于球形目标的标定方法均可完成激光束空间方位的标定,使传感器在各个方位上都具有测量功能<sup>[9]</sup>,并且测量精度能够满足逆向工程的测量要求。

## 5 结 论

本文应用激光位移传感器、PH10 回转体和三坐标测量机等搭建了非接触式测量平台。为了实现传感器在任意方位的测量,提出了基于标准球的激光束方向标定方法。标定过程中,传感器分别沿测量机的 X、Y 和 Z 轴做等步长移动,根据步长和激光束长度的变化建立方程组来求解激光束所在直线的方向向量,从而将传感器的一维长度值转化为测量点的三维坐标值,进而完成三维点云的创建<sup>[10]</sup>。实验结果表明,本文提出的方法使标定后的激光位移传感器具有全方位测量功能;系统具有良好的重复性,且测量不确定度为 0.048 mm,能够保证较高的测量精度,满足实际使用要求。

## 参考文献:

- [1] 梅剑春,叶青,田建国. 钢管管端内外径测量系统的设计与实现 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 815-821.  
MEI J CH, YE Q, TIAN J G. Design of measurement system for inside and outside diameters of steel pipe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 815-821. (in Chinese)
- [2] 周森,郭永彩,高潮,等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1524-1530.  
ZHOU S, GUO Y C, GAO CH, *et al.*. Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [3] 出晓兰,王磊,胡天林,等. 坐标测量机激光位移测头的标定方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 426-429.  
CHU X L, WANG L, HU T L, *et al.*. Study on calibration method of laser displacement sensor coordinates measurement machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4): 426-429. (in Chinese)
- [4] 卢科青,王文,陈子辰. 点激光测头激光束方向标定 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 880-886.  
LU K Q, WANG W, CHEN Z CH. Calibration of laser beam-direction for point laser sensors [J].

- Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 880-886. (in Chinese)
- [5] 周会成,曾理湛,陈吉红,等. 点光源测头光束方向的标定 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(3): 388-391.  
ZHOU H CH, ZENG L ZH, CHEN J H, *et al.*. Calibration of light beam's direction of point light source probe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(3): 388-391. (in Chinese)
- [6] 解则晓,程传景,张成国,等. 利用测头等效法确定激光单点测头的方向 [J]. 光电工程, 2005, 32(5): 46-49.  
XIE Z X, CHENG CH J, ZHANG CH G, *et al.*. Study on determining the direction of laser beam sensors via equivalent-probe approach [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(5): 46-49. (in Chinese)
- [7] XIE Z X, WANG J G, ZHANG Q M. Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45: 1474-1486.
- [8] DAVID B, GABI H. Calibration process for shape measurement:US, 6199024 B1[R]. 2001-03-06.
- [9] WANG G Y, ZHENG B. Modelling and calibration of the laser beam-scanning triangulation measurement system [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 40: 267-277.
- [10] LI Y D, GU P H. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. *Computer Aided Design*, 2004, 36: 1395-1417.

#### 作者简介:



毕超(1987-),男,河北廊坊人,硕士,机械工程师,2010年于河北工业大学获得学士学位,2013年于天津大学获得硕士学位,主要从事精密测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: 773721278@qq.com



房建国(1963-),男,北京人,研究员,1985年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事精密、超精密加工与坐标测量等方面的研究。E-mail: fkylek@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)