

激光束空间位姿高精度标定方法

段晓登, 吴斌, 康杰虎*

天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 关节型激光传感器是新型的跨尺度空间、非接触三维坐标测量仪器。为使关节型激光传感器实现精密测量,需要精确标定其系统参数,尤其是标定激光束的空间位姿。提出一种基于平面靶标和球靶标相结合的激光束空间位姿标定方法。通过建立像素坐标系和世界坐标系的矩阵关系,得到激光点的三维坐标,进而通过直线拟合得到激光束的空间位姿。转台旋转轴的空间位姿通过最小区域圆拟合得到。实验结果表明,在 1 m 的测量范围内,传感器系统的最大距离测量误差约为 0.05 mm,新标定方法准确有效。

关键词 传感器; 测量与计量; 参数标定; 图像处理

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0812002

Calibration Method for Spatial Pose of Laser Beam with High-Accuracy

Duan Xiaodeng, Wu Bin, Kang Jiehu*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An articulated laser sensor is a new kind of trans-scale and non-contact 3D coordinate metrological instrument. In order to achieve precise measurement, the system parameters should be calibrated with high-accuracy, especially the spatial pose of laser beam. A calibration method for the spatial pose of laser beam based on the combination of planar target and spherical target is proposed in this paper. The 3D coordinate of laser spots can be obtained by establishing matrix relation between the pixel coordinate system and the world coordinate system. Then the spatial pose of laser beam can be determined by linear fitting, and the spatial poses of rotation axes can be obtained by minimum-zone circle fitting. The experimental results show that the maximum distance measuring error is about 0.05 mm in the measuring range of 1 m, and the novel calibration method is precise and effective.

Key words sensors; measurement and metrology; calibration of parameters; image processing

OCIS codes 280.4788; 150.1488; 100.2000

1 引 言

随着制造业的快速发展,迫切需提高三维测量的效率和精度^[1-3]。为了满足这种需求,一些测量装置用准直激光器取代接触式探头或望远系统,例如经纬仪、非接触式三坐标测量机(CMM)^[4-5]。结合视觉引导单元,测量装置可以实现自动化测量^[6]。

Bi 等^[7]用激光位移传感器取代 CMM 的接触式测头,并提出一种基于标准球的激光束方向向量标定方法,通过 CMM 三轴移动,结合激光位移传感器的距离信息来实现激光束方向向量的标定。Yang 等^[8]设计出一种由 3 个激光位移传感器组成的内径测量装置,并提出同时标定 3 条激光束方向

向量的方法。卢科青等^[9]在 CMM 的 Z 轴上安装点激光器,并设计一个标定面方向可调的标定块来配合标定,但在标定过程中需要利用激光束的长度变化。以上 3 种方法只适用于标定激光束的方向向量,不能完全确定激光束的空间位姿。Sun 等^[10]提出一种激光位移传感器的视觉测量模型,并利用固定在二维位移台上的平面靶标获得激光点三维坐标,但平面靶标需要垂直于位移台的固定平面且平行于位移台的一个运动方向。

针对目前激光束空间位姿标定过程中存在的问题,本文参考线结构光传感器标定方法,提出一种基于平面靶标和球靶标相结合的激光束空间位姿标定方法^[11-13]。经过图像处理得到三维坐标已知的空间

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-04-17; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61771336)、天津市自然科学基金(18JCYBJC38600)

* E-mail: zhongdian313@163.com

点的像素坐标,建立共轭对,进而建立像素坐标系和世界坐标系的矩阵关系。利用图像处理得到激光点的像素坐标,结合矩阵关系,得到激光点的三维坐标,最后利用直线拟合,得到激光束的空间位姿。

2 关节型激光传感器

2.1 系统结构和工作原理

关节型激光传感器系统结构如图 1 所示,它由两个关节型激光传感单元组成,每个单元包括两个一维转台和一个准直激光器。不同于传统的经纬仪,关节型激光传感器采用非正交轴系架构,命名方式上仍采用“竖直轴”、“水平轴”和“视准轴”。关节型激光传感器的数学模型是基于透视投影模型和四元数动力学模型所建立的^[14]。类似于传统的前方交会坐标测量仪器,当左激光器与右激光器精确交会于被测物上时,利用左右单元转台转动的角度和传感器的数学模型,可以计算出交会点的三维坐标。

2.2 系统参数

精确标定关节型激光传感器的系统参数是实现高精度测量的前提条件。如图 1 所示,每个关节型激光传感单元可以抽象为 3 条空间直线。为了计算

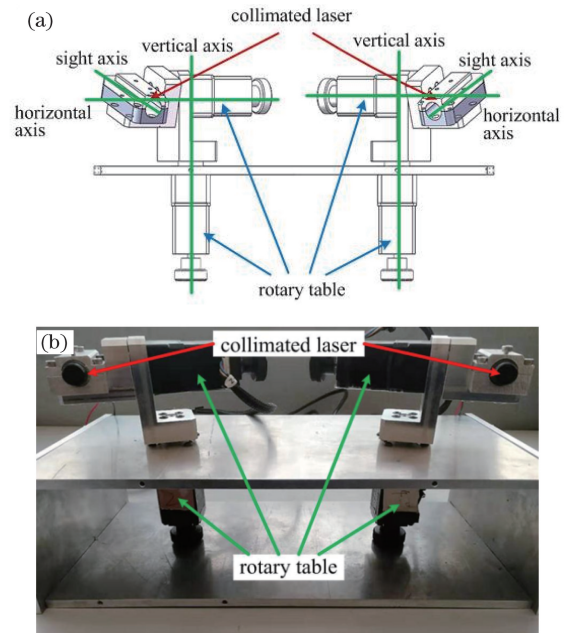


图 1 关节型激光传感器系统结构。

(a) 结构示意图; (b) 实物图

Fig. 1 Structure of an articulated laser sensor.

(a) Structural representation; (b) real product

交会点的三维坐标,需要标定左右单元三轴的空间相对位姿。关节型激光传感器的系统参数及其物理意义如表 1 所示。

表 1 系统参数及物理意义

Table 1 System parameters and physical meaning

Left/right module	Category	Parameter	Physical meaning
Left module	Vertical axis	(x_{LV}, y_{LV}, z_{LV})	Direction vector of vertical axis
		$(x_{LVO}, y_{LVO}, z_{LVO})$	Fixed point of vertical axis
	Horizontal axis	(x_{LH}, y_{LH}, z_{LH})	Direction vector of horizontal axis
		$(x_{LHO}, y_{LHO}, z_{LHO})$	Fixed point of horizontal axis
	Sight axis	(x_{LS}, y_{LS}, z_{LS})	Direction vector of sight axis
		$(x_{LSO}, y_{LSO}, z_{LSO})$	Fixed point of sight axis
Right module	Vertical axis	(x_{RV}, y_{RV}, z_{RV})	Direction vector of vertical axis
		$(x_{RVO}, y_{RVO}, z_{RVO})$	Fixed point of vertical axis
	Horizontal axis	(x_{RH}, y_{RH}, z_{RH})	Direction vector of horizontal axis
		$(x_{RHO}, y_{RHO}, z_{RHO})$	Fixed point of horizontal axis
	Sight axis	(x_{RS}, y_{RS}, z_{RS})	Direction vector of sight axis
		$(x_{RSO}, y_{RSO}, z_{RSO})$	Fixed point of sight axis

3 系统参数标定原理

3.1 水平轴和竖直轴标定

将两个 G10 级陶瓷球分别粘贴在左右关节型激光传感单元上,以 20° 间隔角分别沿水平和竖直方向旋转左右单元的两个转台,用 CMM 测量每个

位置处陶瓷球的中心坐标,共得到 18 个测量点的坐标值。利用最小区域圆法对每组测量点进行拟合,将拟合所得圆心作为相应轴的固定点,法向量作为相应轴的方向向量。

3.2 视准轴标定

在三维空间中,激光束可以视为一条空间直线。

在世界坐标系下,激光束的空间方程为

$$\frac{x_w - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_w - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z_w - z_1}{z_2 - z_1}, \quad (1)$$

式中:\$(x_1, y_1, z_1)\$和\$(x_2, y_2, z_2)\$为激光点的空间坐标。因此,视准轴标定的关键是获得激光点在世界坐标系下的坐标。

激光点三维坐标标定原理如图 2 所示。\$P_1\$、\$P_2\$、\$P_3\$ 和 \$P_4\$ 为陶瓷球的球心,\$p_1\$、\$p_2\$、\$p_3\$ 和 \$p_4\$ 为球心在目标平面上的投影点。经相机采集和图像处理, \$p'_1\$、\$p'_2\$、\$p'_3\$ 和 \$p'_4\$ 分别为 \$p_1\$、\$p_2\$、\$p_3\$ 和 \$p_4\$ 对应像平面上的点,即 \$p'_i\$ 和 \$p_i\$ 构成共轭对,\$i\$ 为陶瓷球及其像平面对应像的序号,\$i=1,2,3,4\$。激光器固定后,将激光束和目标平面的交点定义为 \$p_L\$。设世界坐标系为 \$O_w-x_w y_w z_w\$,像素坐标系为 \$O-uv\$,像平面平行于目标平面。

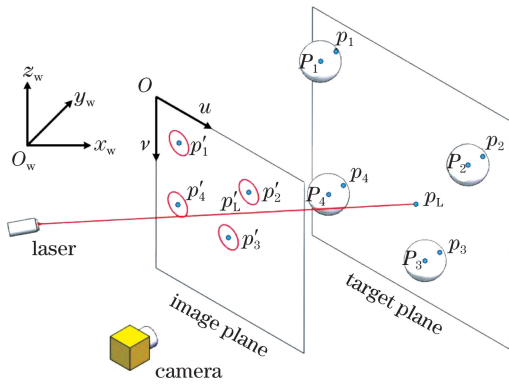


图 2 激光点三维坐标标定原理

Fig. 2 Calibration principle of laser spot 3D coordinate

在世界坐标系下,设目标平面的方程为

$$l(x_w - x'_w) + m(y_w - y'_w) + n(z_w - z'_w) = 0, \quad (2)$$

式中:\$(l, m, n) = \mathbf{V}\$ 为目标平面的单位法向量;\$(x'_w, y'_w, z'_w)\$为目标平面上一点的三维坐标。

为方便叙述,图 2 中各点在相应坐标系下的坐标如表 2 所示。

因为像平面平行于目标平面,对于当前目标平面上的空间点,设其世界坐标系和像素坐标系之间的矩阵关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} - \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:\$\mathbf{R}\$ 为世界坐标系与像素坐标系之间的旋转矩阵;\$\mathbf{T}\$ 为世界坐标系与像素坐标系之间的平移矩

表 2 各点在相应坐标系下的坐标表示

Table 2 Coordinate representation of each point in corresponding coordinate system

Point	\$O_w-x_w y_w z_w\$	\$O-uv\$
\$p'_1\$		\$(u_1, v_1)\$
\$p'_2\$		\$(u_2, v_2)\$
\$p'_3\$		\$(u_3, v_3)\$
\$p'_4\$		\$(u_4, v_4)\$
\$p'_L\$		\$(u_L, v_L)\$
\$p_1\$	\$(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})\$	
\$p_2\$	\$(x_{w2}, y_{w2}, z_{w2})\$	
\$p_3\$	\$(x_{w3}, y_{w3}, z_{w3})\$	
\$p_4\$	\$(x_{w4}, y_{w4}, z_{w4})\$	
\$p_L\$	\$(x_{wL}, y_{wL}, z_{wL})\$	

阵;\$t_x, t_y, t_z\$ 分别为平移矩阵的分量;\$r_{pq}\$ (\$p\$ 和 \$q\$ 分别为旋转矩阵的行序号和列序号,\$p, q=1,2,3\$) 为旋转矩阵的分量。

(3)式可转换成另一形式:

$$\begin{cases} u = r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_x \\ v = r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y \\ 1 = r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z \end{cases} \quad (4)$$

将共轭对(即 \$p'_i\$ 和 \$p_i\$)的三维坐标和像素坐标代入(4)式中可得

$$\begin{cases} u_i = r_{11}x_{wi} + r_{12}y_{wi} + r_{13}z_{wi} + t_x \\ v_i = r_{21}x_{wi} + r_{22}y_{wi} + r_{23}z_{wi} + t_y \\ 1 = r_{31}x_{wi} + r_{32}y_{wi} + r_{33}z_{wi} + t_z \end{cases} \quad (5)$$

(5)式中共有 12 个未知数,所以需要 4 组共轭对。将 4 组共轭对的坐标分别代入(5)式,可以求解得出 \$r_{pq}\$ 和 \$t_x, t_y, t_z\$, 即得到 \$\mathbf{R} - \mathbf{T}\$。

因此,激光点的空间三维坐标可以通过(6)式计算得出:

$$\begin{bmatrix} x_{wL} \\ y_{wL} \\ z_{wL} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

4 图像处理

图 3 为实验中相机采集得到的原始图像,包括 1 个激光点、4 个白斑和 4 个陶瓷球。其中位于图像中部区域的 4 个白斑用于图像透视校正,保证像平面平行于目标平面。

图像质心提取的流程如下:

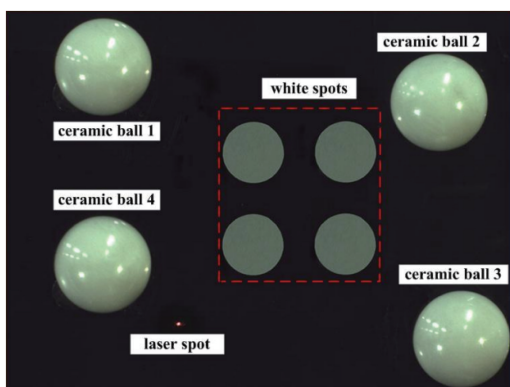


图 3 原始图像

Fig. 3 Original image

1) 通过中值滤波和高斯滤波去除图像中的椒盐噪声和高斯噪声；

2) 采用形态学操作的开运算,使边界平滑,同时去除图像中由于环境光和激光反射等造成的微小白斑；

3) 通过设置不同的阈值进行图像二值化,分别提取激光点、白斑和陶瓷球；

4) 采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法进行图像边缘检测^[15]；

5) 采用质心法得到中心点的像素坐标^[16]。

将位于图像中部区域的白斑中心的像素坐标作为控制点,采用基于双灭点的图像透视变换方法进行图像校正^[17]。陶瓷球中心的像素坐标与其对应三维坐标组成共轭对,代入(5)式,求解像素坐标系与世界坐标系的矩阵关系 $R-T$ 。

5 实 验

为保证系统参数标定结果精确可靠,实验中利用 CMM 对关节型激光传感器的系统参数进行测定。将 CMM 的坐标系定义为世界坐标系。CMM 的测量精度为 $2.1 \mu\text{m} + 2.8 \times 10^{-6} L$, L 为测量距离;相机采用深圳元启智能技术公司(中国)生产的 REV-50AM/C-U2C 型工业相机,最大分辨率为 $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$;镜头采用维视智造(中国)生产的 BT-2364 型远心镜头;目标平面采用深圳市龙图光电公司(中国)生产的光掩膜铬板,表面的平面度小于 $20 \mu\text{m}$;陶瓷球直径为 7.144 mm ,G10 级,球形偏差 $0.25 \mu\text{m}$ 。标定实验装置如图 4 所示。

5.1 水平轴和竖直轴标定

如图 4 所示,两个陶瓷球分别固定在传感器左右单元上,分别通过水平和竖直旋转转台,测量陶

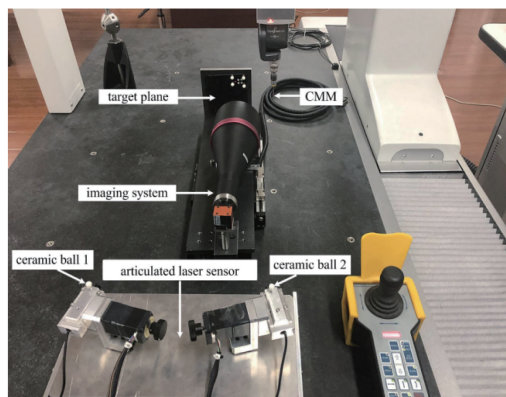


图 4 标定实验装置

Fig. 4 Calibration experiment equipment

瓷球 1 和陶瓷球 2 的球心坐标,得到 4 组测量点集。如图 5 所示,左右单元水平轴及竖直轴的方向向量和固定点通过最小区域圆拟合得到。在世界坐标系下,水平轴和竖直轴系统参数如表 3 所示。

5.2 视准轴标定

如图 4 所示,将目标平面和成像系统固定在一维线位移台上,同时在目标平面上粘 4 个陶瓷球。由于球的透视投影图像一般不是标准圆,而是一个椭圆,且椭圆的几何中心不同于球心真实成像中心^[18],因此,实验中采用远心镜头来消除一般镜头导致的成像误差。

根据视准轴标定原理,激光束的标定过程如下:

1) 将关节型激光传感器和标定装置放置在 CMM 平台上;

2) 通过转台调整激光方向,确保在目标平面上形成清晰明亮的激光点;

3) 利用 CMM 测量 4 个陶瓷球的球心坐标,分别记为 $(x_{w_i}, y_{w_i}, z_{w_i})$, $i=1,2,3,4$;

4) 利用 CMM 测量目标平面上 6 个点,得到目标平面的参数,包括单位法向量和一个固定点的坐标,分别记为 (l, m, n) 和 (x'_w, y'_w, z'_w) ;

5) 利用带远心镜头的相机采集图像,并将采集到的图像按第 4 节介绍的方法进行处理;

6) 建立像素坐标系与世界坐标系的矩阵关系,求解当前位置激光点的三维坐标;

7) 移动标定装置,重复步骤 3)~6) 6 次,得到激光束上 6 个激光点的三维坐标;

8) 利用最小二乘法进行空间直线拟合,得到激光束的参数,包括方向向量和固定点坐标。直线拟合结果如图 6 所示,系统参数如表 4 所示。

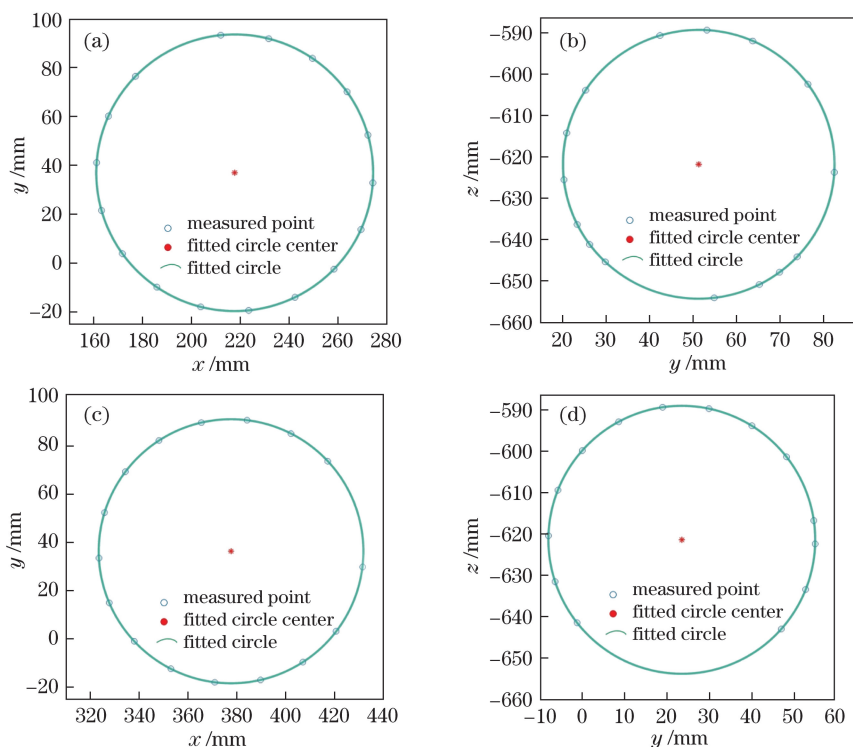


图 5 圆拟合结果。(a)左单元竖直轴;(b)左单元水平轴;(c)右单元竖直轴;(d)右单元水平轴
 Fig. 5 Results of circle fitting. (a) Vertical axis of left module; (b) horizontal axis of left module;
 (c) vertical axis of right module; (d) horizontal axis of right module

表 3 水平轴和竖直轴系统参数

Table 3 System parameters of horizontal and vertical axes

mm

Left/right module	Category	System parameter	
Left module	Horizontal axis	Direction vector	$(0.957983, -0.286808, 0.003181)$
		Fixed point	$(169.680000, 51.262000, -622.078000)$
	Vertical axis	Direction vector	$(0.002228, 0.003319, -0.999992)$
		Fixed point	$(217.771000, 36.764000, -602.765000)$
Right module	Horizontal axis	Direction vector	$(0.994939, -0.100413, -0.003714)$
		Fixed point	$(426.697000, 23.508000, -622.327000)$
	Vertical axis	Direction vector	$(-0.005708, 0.003100, -0.999979)$
		Fixed point	$(378.383000, 36.193000, -602.448000)$

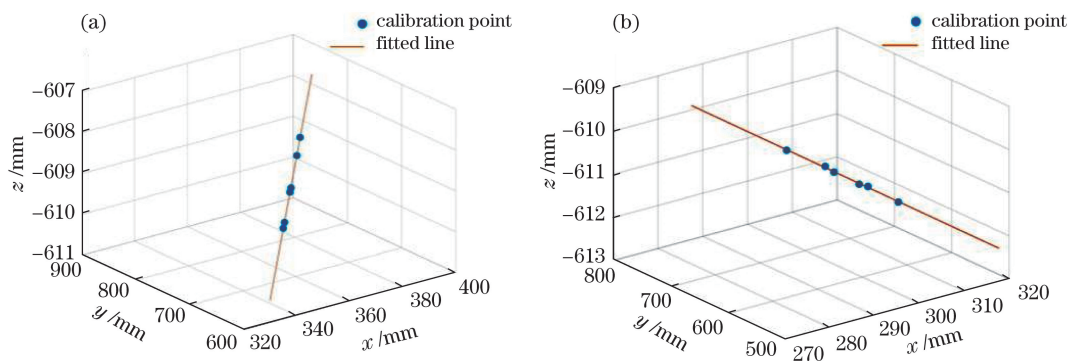


图 6 直线拟合结果。(a)左单元视准轴;(b)右单元视准轴
 Fig. 6 Results of linear fitting. (a) Sight axis of left module; (b) sight axis of right module

表 4 视准轴系统参数

Table 4 System parameters of sightaxis

mm

Left/right module	Category	System parameter
Left module	Direction vector	(0.277045, 0.960857, -0.000547)
	Fixed point	(361.211000, 714.754000, -619.939000)
Right module	Direction vector	(-0.217045, 0.976162, 0.000698)
	Fixed point	(298.145000, 608.918000, -619.126000)

5.3 标定结果精度验证

如图 7 所示, 标定完成后, 保持传感器位置不动, 利用半球靶标验证系统参数标定的精度。半球靶标直径为 38.1 mm, 球心位置精度为 0.01 mm。

将半球靶标放置在 CMM 平台上不同位置, 分别用 CMM 和关节型激光传感器来测量其球心坐标。将 CMM 所测得的两位置之间的距离作为真值, 关节型激光传感器测得的两位置之间的距离作为测量值, 真值与测量值测量结果对比如表 5 所示。

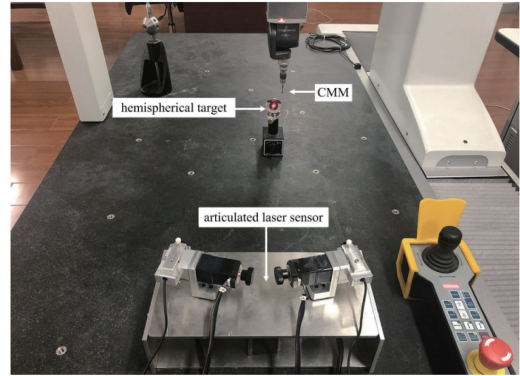


图 7 测量实验装置

Fig. 7 Measurement experiment equipment

表 5 真值和测量值对比

Table 5 Comparison between the measured values and standard values

Point number	Left/right module	Horizontal angle / (°)	Vertical angle / (°)	Measured value / mm	Standard value / mm	Error / mm																																																																																						
1	Left	0	0.915	75.627	75.613	0.013																																																																																						
	Right	0	0.851				2	Left	0	0.920	283.295	283.245	0.050	Right	3.570	0.888	3	Left	9.550	1.567	111.441	111.484	-0.043	Right	-4.400	1.507	4	Left	6.880	1.798	200.538	200.580	-0.042	Right	11.970	1.914	5	Left	-25.520	1.905	169.024	169.069	-0.045	Right	-18.750	1.557	6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223		Right	-23.750	7.011	7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254		
2	Left	0	0.920	283.295	283.245	0.050																																																																																						
	Right	3.570	0.888				3	Left	9.550	1.567	111.441	111.484	-0.043	Right	-4.400	1.507	4	Left	6.880	1.798	200.538	200.580	-0.042	Right	11.970	1.914	5	Left	-25.520	1.905	169.024	169.069	-0.045	Right	-18.750	1.557	6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223		Right	-23.750	7.011	7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223						
3	Left	9.550	1.567	111.441	111.484	-0.043																																																																																						
	Right	-4.400	1.507				4	Left	6.880	1.798	200.538	200.580	-0.042	Right	11.970	1.914	5	Left	-25.520	1.905	169.024	169.069	-0.045	Right	-18.750	1.557	6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223		Right	-23.750	7.011	7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																
4	Left	6.880	1.798	200.538	200.580	-0.042																																																																																						
	Right	11.970	1.914				5	Left	-25.520	1.905	169.024	169.069	-0.045	Right	-18.750	1.557	6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223		Right	-23.750	7.011	7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																										
5	Left	-25.520	1.905	169.024	169.069	-0.045																																																																																						
	Right	-18.750	1.557				6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223		Right	-23.750	7.011	7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																																				
6	Left	-27.450	8.080	3.100	1.223																																																																																							
	Right	-23.750	7.011				7	Left	-9.420	7.621				Right	-6.872	7.306	8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																																														
7	Left	-9.420	7.621																																																																																									
	Right	-6.872	7.306				8	Left	10.570	8.452				Right	12.975	9.101	9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																																																								
8	Left	10.570	8.452																																																																																									
	Right	12.975	9.101				9	Left	14.250	1.227				Right	19.000	1.400	10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																																																																		
9	Left	14.250	1.227																																																																																									
	Right	19.000	1.400				10	Left	-1.250	1.254				Right	3.100	1.223																																																																												
10	Left	-1.250	1.254																																																																																									
	Right	3.100	1.223																																																																																									

从表5可以看出,经过标定以后,关节型激光传感器的距离测量最大偏差为0.050 mm。说明本文提出的激光束空间位姿标定方法精度高,可以满足传感器测量需要。

6 结 论

提出一种高精度激光传感器系统参数标定方法,尤其是激光束空间位姿的标定方法。激光束空间位姿标定装置使用球形靶标和平面靶标,结构上无特殊形位要求,易于设计,操作简便。结合图像处理与曲线拟合,测量数据处理简单,标定结果可靠性高。实验结果表明,利用该方法标定的关节型激光传感器,测量精度高,测量结果稳定。因此,该方法适用于激光传感器的系统参数标定,可广泛应用于实际工业测量中激光束空间位姿的标定。

参 考 文 献

- [1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [2] Guo J P, Peng X, Li A M, *et al.* Automatic and rapid whole-body 3D shape measurement based on multinode 3D sensing and speckle projection[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8759-8768.
- [3] Xing W, Zhang F M, Feng W, *et al.* Three-dimensional measurement method of objects with specular surface based on digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1212002.
邢威, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1212002.
- [4] Dong Z X, Sun X W, Liu W J, *et al.* Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 30-38.
董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 30-38.
- [5] Shi J L, Sun Z X, Bai S Q. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser rangefinder[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2814-2823.
- [6] Wu B, Su X Y. A precise guiding method for automatic measurement with visual guiding theodolites[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(4): 453-457.
吴斌, 苏晓越. 一种视觉引导经纬仪自动测量中精确引导方法[J]. *激光技术*, 2015, 39(4): 453-457.
- [7] Bi C, Liu Y, Fang J G, *et al.* Calibration of laser beam direction for optical coordinate measuring system[J]. *Measurement*, 2015, 73: 191-199.
- [8] Yang T Y, Wang Z, Wu Z G, *et al.* Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 294.
- [9] Lu K Q, Wang W, Chen Z C. Calibration of laser beam-direction for point laser sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 880-886.
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.
- [10] Sun J H, Zhang J, Liu Z, *et al.* A vision measurement model of laser displacement sensor and its calibration method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(12): 1344-1352.
- [11] Chen T F, Zhao J B, Wu X. New calibration method for line structured light sensor based on planar target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112004.
- [12] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315001.
解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315001.
- [13] Zhou J B, Li Y H, Qin Z Y, *et al.* Calibration of line structured light sensor based on reference target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0412005.
周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0412005.
- [14] Li M Z, Xu B, Zhang L. Orbit determination for remote-sensing satellites using only optical imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(5): 1350-1364.
- [15] Mai J, Ning M. Sub-pixel edge detection method based on Zernike moment[C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), May 23-25, 2015, Qingdao, China. New York: IEEE, 2015: 3673-3676.
- [16] Luo L Y, Xu L P, Zhang H. Improved centroid extraction algorithm for autonomous star sensor[J]. *IET Image Processing*, 2015, 9(10): 901-907.
- [17] Luo X H, Du Z B. Method of image perspective transform based on double vanishing point[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(15): 212-214.

- 罗晓晖, 杜召彬. 基于双灭点的图像透视变换方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(15): 212-214.
- [18] Gu F F, Zhao H, Bu P H, *et al.* Analysis and correction of projection error of camera calibration ball[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1215001.
- 谷飞飞, 赵宏, 卜鹏辉, 等. 用于相机标定的球靶标投影误差分析与校正[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1215001.