

激光跟踪绝对测长多边法三维坐标测量系统

吴斌¹, 许友¹, 杨峰亭¹, 钱春强², 蔡蓓²

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 上海跃盛信息技术有限公司, 上海 201100)

摘要: 现今随着大型工件制造、装配需求的增加, 对此类产品的制造装配精度的需求也在不断地提高。高精度的测量和控制成为制约高端制造业发展的一个重要因素。对此文中研究了一种基于激光跟踪绝对测长多边法三维坐标测量系统, 该系统由四台绝对距离测量激光跟踪仪和上位机构成, 既充分利用了绝对激光干涉测距的精度优势和断光续接的能力, 又避免了传统激光跟踪仪角度测量带来的误差。同时, 为提高自标定算法的精度, 提出并研究了一种依赖距离的残差模型。通过实验表明, 该系统实现了在 20 m 大范围空间内小于 $\pm 20 \mu\text{m}$ 的测量误差, 测量不确定度为 $12.3 \mu\text{m}$ 。较之单台绝对激光跟踪仪系统的精度有很大的提升, 实现了在工业现场在线、高效、精密的三维坐标测量。

关键词: 多边法; 绝对激光跟踪仪; 相对残差; 坐标测量

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0806007

3D coordinate measuring system based on laser tracking absolute length measurement multilateral method

Wu Bin¹, Xu You¹, Yang Fengting¹, Qian Chunqiang², Cai Bei²

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Shanghai YS Information Technology Co., Ltd Shanghai 201100, China)

Abstract: With today's increase in large parts manufacturing and assembly requirements, the demand for precision manufacturing and assembly of such products are constantly improved. High-precision measurement and control has become an important factor restricting the development of high-ranking manufacturing. A three-dimensional coordinate measurement system based on laser tracking and absolute length measurement was developed. The system consisted of four absolute laser trackers and a host computer. The ADM module in the absolute laser tracker provided the distance from the target point to four basis points. And the three-dimensional coordinate value of the target point was calculated by the multilateral method. The system overcame the shortcomings of the laser tracking interferometer and can widen the application range of the measuring system. Simultaneously, in order to improve the accuracy of the self-calibration algorithm, a distance-dependent residual model was proposed and studied. The

收稿日期: 2018-03-07; 修订日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51475328)

作者简介: 吴斌(1975-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光及光电测试、视觉测量技术及应用、精密测量技术及仪器等方面的研究。Email: wubin@tju.edu.cn

feasibility and accuracy of the self-calibration algorithm were illustrated by experiments. After the calibration of the system parameters was completed efficiently, the precision of the measurement system was tested. The experimental results show that the system has a measurement error of less than $\pm 20 \mu\text{m}$ in a large space of 20 m and the measurement uncertainty is $12.3 \mu\text{m}$. Compared with a single absolute laser tracker system, the accuracy of the system has greatly improved. The system realizes on-line, high-efficient and accurate three-dimensional coordinate measurement in the industry scene.

Key words: multilateral; absolute laser tracker; relative residual; coordinate measurement

0 引言

随着装备制造业的飞速发展,一方面,工件尺寸呈现出越来越大的趋势;另一方面,对工件的制造和装配精度提出了越来越高的要求^[1-2]。在航空航天、电力、轨道交通、船舶、重工等领域,都要求在大尺寸范围内或对大型工件的三维坐标、形面特征等实现在线、快速、精确测量^[3]。所以,如何在大尺寸范围内实现高精度三维坐标测量成为了该研究领域的热点问题。目前,可实现大尺寸范围三维坐标测量的仪器系统主要有摄影测量系统、室内 GPS (iGPS)、全站仪、激光跟踪仪和经纬仪等。摄影测量系统和 iGPS 是近几年新兴的大尺寸坐标测量手段,受限于核心器件性能水平的限制,目前仅能实现亚毫米的测量精度。全站仪、激光跟踪仪和经纬仪是传统的大尺寸坐标测量手段,对该类测量仪器而言,角度测量是其实现坐标测量的重要环节,而高精度的角度测量在几何量测量中又较难以实现。以 Leica AT960 绝对激光跟踪仪为例,在全量程范围内,其绝对距离测量模块(ADM)的测长不确定度优于 $10 \mu\text{m}$,但结合角度测量的坐标测量不确定度却仅为 $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ 。由此可见,角度测量环节的引入,使得该仪器随着测量距离的增加,测量误差明显增大,大尺寸测量应用时,整体测量精度将急剧下降。

对此,相关学者提出了激光多边法以实现大尺寸范围的精确测量,日本国家计量研究室研制了基于激光跟踪原理和多边法的柔性坐标测量系统,并研究了基于测量误差的自标定算法^[4-5]。德国联邦物理技术研究院(PTB)研制出了 M3D3 测量系统,用于三坐标测量机的标定^[6-7]。国内天津大学张国雄教授团队对激光跟踪转镜机构、系统自标定、布局优化等

相关技术进行了研究^[8-9]。

上述研究中,大都采用激光干涉相对距离测量技术,因此在测量过程中不允许断光,造成在工业现场应用的不便性^[10-11]。文中则基于绝对距离测量技术,利用四台绝对距离测量激光跟踪仪,研究并搭建了多边法三维坐标测量系统,并提出了一种新的自标定算法残差模型,进行了实验验证。

1 激光多边法测量原理

所谓激光多边法即摒弃角度测量环节,仅利用激光干涉测距的信息,提出的一种高精度三维坐标测量方法。激光多边法和 GPS 定位原理相似,其基本思想是已知三个基点(如图 1 中的 S_1, S_2, S_3)在某一坐标系中的坐标,若待测点 P 到三个基点的距离精确测定,即可确定 P 点在该坐标系中三维坐标。

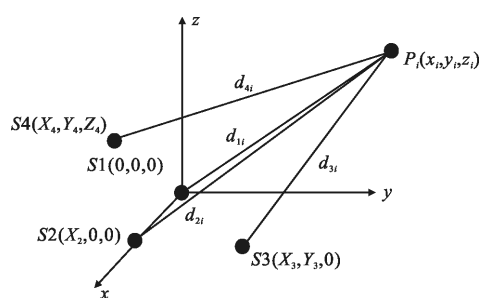


图 1 基点和动点的位置关系

Fig.1 Position relationship between base point and the measuring point

文中提出的基于激光跟踪绝对测长多边法三维坐标测量系统由四台绝对激光跟踪仪(LeicaAT960)、上位机和靶球组成。由于绝对激光跟踪仪的测距模块可以实现断光续接,这就意味着,在测量过程中,此系统克服了以往激光跟踪干涉仪无法断光测量的

缺点,大大降低了测量系统对测量环境的依赖性和被测工件的安放局限性,在实际应用中有更加广阔的前景。

2 基于绝对测长的参数标定残差模型

以往的基于激光干涉相对距离测量的参数标定模型由于系统的测距原理是相对测距,所以需要额外引入一个测量基点。系统实际测量得到的距离值是相对于该基点的距离值,所以要标定的参数又增加了三个,标定过程更加复杂。而文中基于绝对测长的参数标定残差模型在系统标定工作时,只需测量每一个标定点到四个测量基点的距离值,通过三边测量原理和相关的优化算法即可得到系统参数值。

由图 1 所示,已知空间中三个站点在世界坐标系中的坐标 $S_j=(X_j, Y_j, Z_j), j=1, 2, 3,$ 和每个站点到动点 P_i 的距离值 d_{ij} ,建立下述的球面方程组(1),通过解此方程组即可得到动点 P_i 的空间坐标。在此基础上,若再引入一台绝对激光跟踪仪测量站点 S_4 ,构成冗余系统,即可实现系统的自标定。

$$\begin{cases} (x_i-X_1)^2+(y_i-Y_1)^2+(z_i-Z_1)^2=d_{1i}^2 \\ (x_i-X_2)^2+(y_i-Y_2)^2+(z_i-Z_2)^2=d_{2i}^2 \\ (x_i-X_3)^2+(y_i-Y_3)^2+(z_i-Z_3)^2=d_{3i}^2 \end{cases} \quad (1)$$

所谓自标定,就是不依赖其他测量设备,而仅仅依靠系统自身来确定四个站点的空间坐标关系。为了方便起见,如图 1 所示,将 1 号跟踪仪长度测量原点设为 S_1 ,选为测量系统的坐标系原点,令其 X 轴过 2 号跟踪仪长度测量原点 S_2 ,同时设置 Y 轴垂直于 X 轴且其与 X 轴构成的平面通过 3 号跟踪仪长度测量原点 S_3 ,即令 S_3 位于 $X-Y$ 平面上; Z 轴方向由右手定则确定。 S_4 的位置则没有任何约束。设四站设备的坐标为 $(X_j, Y_j, Z_j)(j=1, 2, 3, 4)$,相应各站激光跟踪仪测到的距离为 d_{ij} 。所以需要标定的系统参数即

$$S=(X_2, X_3, Y_3, X_4, Y_4, Z_4) \quad (2)$$

根据公式(1),任选其中的三个站点计算得到目标点的坐标为 $P_{ij}=(x_i, y_i, z_i)$,其中 P_{ij} 表示不包含第 j 台站点的距离值时的计算值。

该目标点和第 j 台站点的距离

$$l_{ij}=|P_{ij}S_j|=\sqrt{(x_i-X_j)^2+(y_i-Y_j)^2+(z_i-Z_j)^2} \quad (3)$$

设 d_{ij} 为第 j 台站点的测得值,令

$$\text{Res}=l_{ij}-d_{ij} \quad (4)$$

一般情况下,残差 Res 为两点间距离的计算值和测得值之差。但是考虑到,激光多边法的测量误差消除了传统的角度误差,误差的来源主要为测长误差,为此,文中定义一种依赖于距离的残差模型,称之为相对残差 f 。即

$$f_{ij}=\frac{\text{Res}_{ij}}{l_{ij}}=1-\frac{d_{ij}}{l_{ij}} \quad (5)$$

每个被测点都可建立四个残差方程,而每增加一个被测点则额外引入三个未知数。当 $6+3i \leq 4i$ 时,即被测点个数大于等于 6 时,便可完成系统的自标定。在实际操作过程中,一般测量 20~50 个被测点,形成非线性超定方程组,再利用最优化方法使残差和最小,从而得到最优解。为了使新定义的残差总和最小,即

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n f_{ij}^2 = f^T f \rightarrow \min \quad (6)$$

文中采用 Levenberg-Marquardt 算法来解上述非线性超定方程组。

算法中要求的预估迭代的初值 $S_0=(X_2, X_3, Y_3, X_4, Y_4, Z_4)_0$,可利用激光跟踪仪测得每台激光跟踪仪之间的大致相对距离,通过四台绝对激光跟踪仪构成的四面体的几何关系,便可计算得出四台激光跟踪仪的初始坐标,从而利用该初始坐标进行迭代计算。

完成标定步骤之后,配合四台绝对激光跟踪仪跟踪同一个靶球,即可进行测量。对于每一个被测点,能建立四个方程,而此时系统参数已经通过自标定步骤得到,所以只有被测点坐标的三个未知数。为了提高被测点的精度和克服一定的随机误差,可采用 Levenberg-Marquardt 算法进行最小二乘迭代,从而得到被测点的最优解。

3 系统构建及实验验证

3.1 系统构建与标定

测量系统中包括四台 Leica AT960 绝对激光跟踪仪、上位机及测量靶球,绝对激光跟踪仪和靶球如图 2 所示。实验中,采用了如图 3 所示的布局方案和标定点采集区。通过上位机软件获取绝对激光跟踪仪中的绝对距离测量模块的读数,即可得到每一台绝对激光跟踪仪测长原点距目标点的距离值。实验

中,采集了 50 个标定点数据,通过上节的参数标定模型即可求解得出系统参数,如表 1 所示。

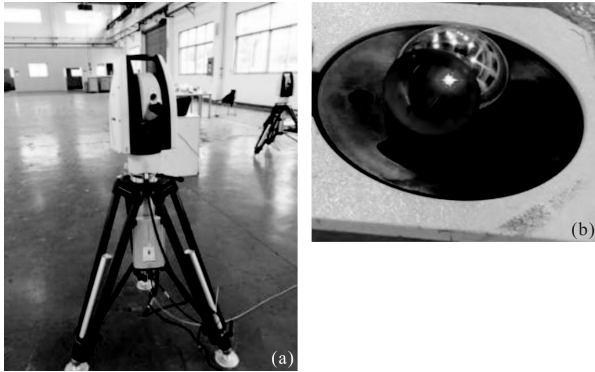


图 2 绝对激光跟踪仪(Leica AT960)和靶球

Fig.2 Leica AT960 absolute laser tracker and the target sphere

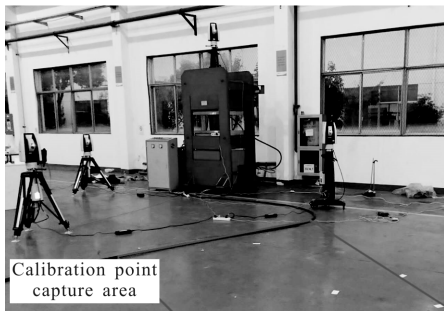


图 3 自标定实验

Fig.3 Self-calibration experiment

表 1 自标定实验结果

Tab.1 Results of self-calibration experiment

X_2/mm	X_3/mm	Y_2/mm	X_4/mm	Y_4/mm	Z_4/mm
3 748.4630	-257.9109	4 021.0760	3 235.0527	3 119.9261	3 120.2864

3.2 精度测试实验

为了验证系统的精度,文中利用上述坐标测量系统测量一段已知长度的基准尺两端的三维坐标,再根据两点间距离公式得到基准尺的长度。通过对比测量值和标称值的误差,从而评价系统的坐标测量精度。在精度测试实验中,文中使用了海克斯康公司提供的标尺作为基准尺。基准尺由殷钢制造而成,其热膨胀系数很小,所以具有很高的稳定性,是作为标准量具的主要材料。进行试验时,实验室的温度为 23 ℃,由温度引起的误差基本可以忽略不计。基准尺

如图 4 所示,其长度 $L=800.0300\text{ mm}$ 。

测量时,在标尺两端的球座上分别放置两个靶球,为了避免人为干扰引起的误差,测量时不能接触基准尺和触碰靶球。所以测量时,可用第三个靶球将四台激光跟踪仪引导至基准尺上一端的靶球上,待测量完毕,再将激光束引导至另一个靶球上,从而得到基准尺两端的三维坐标值。



图 4 基准尺

Fig.4 Reference scale

在测量空间中,需要测量在不同位置下基准尺的长度,将基准尺摆放在地面的不同位置,如图 5、6 所示。并和标称值进行对比,即可得到该测量系统的误差值。测量数据如表 2 所示。

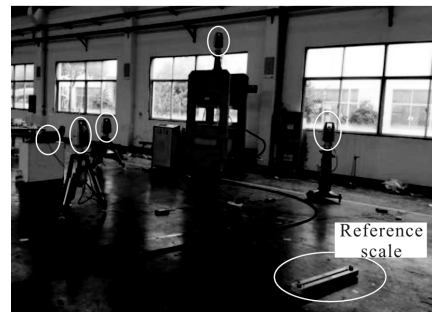


图 5 精度测试实验

Fig.5 Precision measuring experience

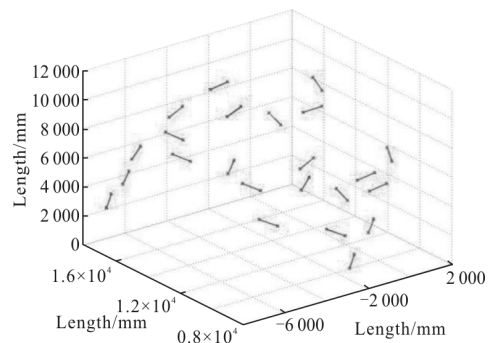


图 6 基准尺的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the reference scale

表 2 精度测试实验结果

Tab.2 Results of precision measuring experience

Position	Measuring point	X/mm	Y/mm	Z/mm	Measuring value/mm	Error/ μm
1	Point 1	-358.705 9	10 841.379 3	5 189.577 2	800.014 1	-15.852 3
	Point 2	247.198	10 543.257 8	5 618.560 5		
2	Point 1	-221.776 3	10 264.029 4	4 695.967 8	800.018 4	-11.606 1
	Point 2	384.823 5	9 971.856	5 128.056 7		
3	Point 1	140.164 7	11 747.259 3	6 886.307 4	800.043 3	13.254 1
	Point 2	-470.359 9	12 091.367 9	6 500.408 2		
4	Point 1	-30.574	13 484.071 5	8 688.255 1	800.035 9	5.915 9
	Point 2	-645.239	13 851.005 6	8 331.038 4		
5	Point 1	-3 819.834	17 252.585 4	8 196.032 5	800.010 3	-19.678 8
	Point 2	-4 364.761 3	17 372.270 3	7 622.668 5		
6	Point 1	-5 651.502 1	17 487.140 8	6 109.332 5	800.046 6	16.584 7
	Point 2	-6 108.564 9	17 424.116 7	5 455.730 1		
7	Point 1	-7 280.561 7	17 191.915 7	3 672.057 3	800.032 6	2.636 0
	Point 2	-7 641.51	17 005.735 3	2 982.778 4		
8	Point 1	-6 063.958 8	15 408.704	3 145.879	800.046 3	16.340 3
	Point 2	-6 448.108 3	15 260.799	2 459.856 1		
9	Point 1	-4 635.447 6	13 192.923 6	2 409.183 1	800.037 7	7.731 2
	Point 2	-4 958.775 8	12 963.754 9	1 714.200 4		
10	Point 1	-3 235.748	11 180.881	1 865.087 5	800.041 3	11.328 3
	Point 2	-3 625.184 7	11 031.999 9	1 182.270 1		
11	Point 1	-1 718.726 9	9 247.369 4	1 569.623 5	800.045 6	15.58 7
	Point 2	-2 076.613 9	9 059.182 5	879.279		
12	Point 1	-3 357.971 2	14 624.743	5 739.198 2	800.011 3	-18.732 5
	Point 2	-3 758.525 1	14 486.407 8	5 060.642 4		
13	Point 1	-1 615.844 2	12 208.686 9	5 170.756 6	800.020 2	-9.810 7
	Point 2	-2 060.101 3	12 134.423 7	4 509.581 2		
14	Point 1	-1 164.043	12 535.682 2	6 131.449 8	800.034 0	4.047 4
	Point 2	-1 713.919 6	12 653.429 1	5 562.392 8		
15	Point 1	-1 070.376 8	11 221.912 1	4 719.726 9	800.035 8	5.764 8
	Point 2	-975.190 8	10 647.414 2	4 171.138 7		
16	Point 1	-2 497.950 6	14 206.657 7	6 370.817	800.035 2	5.185 0
	Point 2	-2 245.294 8	13 569.722 3	5 957.858 6		
17	Point 1	-1 586.343 9	14 754.691	8 171.725 2	800.041 9	11.942 6
	Point 2	-1 474.364 2	14 171.489 2	7 635.625 1		
18	Point 1	229.710 7	14 377.367 3	10 051.235	800.041 5	11.507 5
	Point 2	249.820 8	13 841.789 5	9 457.249 8		
19	Point 1	-4 719.391	17 124.92 71	6 882.321 9	800.039 7	9.677 8
	Point 2	-4 381.201 8	16 473.209 5	6 564.586 6		
20	Point 1	-3 531.141	13 872.716 7	4 641.708 3	800.041 0	11.039 8
	Point 2	-3 162.995	13 219.582 2	4 362.513 9		
21	Point 1	-3 702.228 1	12 605.72	250.149 1	800.043 8	13.817 4
	Point 2	-3 319.470 2	11 960.263 6	2 672.745 9		
22	Point 1	-4 922.991 3	16 438.976	5 827.357 9	800.036 9	6.881 3
	Point 2	-4 558.713	15 788.804 1	5 536.433 8		
23	Point 1	1 027.750 3	10 777.075 5	6 897.480 3	800.040 8	10.807 6
	Point 2	917.853 3	10 336.453 7	6 238.814 7		

通过精度测试实验,由图 7 可以看出,随着测量距离从 10 m 增加至 20 m,测量的精度并没有出现下降的趋势,测量值和真值的误差均控制在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内,说明文中提出的依赖于距离的残差模型对测量误差有一定的抑制作用。根据标准不确定度的 A 类评定原则

$$u(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

测量的不确定度为 $12.3 \mu\text{m}$ 。由于环境的限制,系统的测量误差应该主要来源于地面的微小振动和其他环境因素。相比之下,单台 Leica AT960 的坐标测量不确定度为 $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$,若利用一台绝对激光跟踪仪(Leica AT960)进行坐标测量,当测量范围达到 20 m 时,其测量不确定度为 $135 \mu\text{m}$ 。显然,文中搭建的三维坐标测量系统大大提高了测量精度。

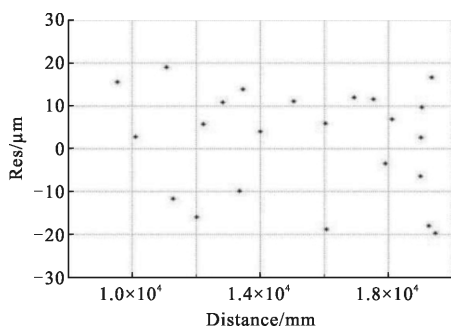


图 7 测量误差随测量距离的分布情况

Fig.7 Distribution of measuring distances as function of measuring error

4 结论

文中研究了一种新型的基于激光跟踪绝对测长多边法三维测量系统,并在此基础上,提出了依赖于距离的残差模型。由四台绝对激光跟踪仪和电脑主机构成一个测量系统,该系统克服了以往激光跟踪干涉测距仪无法断光测量的缺点,满足在复杂工业现场测量的要求。实验表明,系统在范围为 20 m 的测量空间内,测量误差控制在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内,测量不确定度为 $12.3 \mu\text{m}$,实现了在大范围空间内的高精度三维坐标测量,具有很广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Ye Shenghua, Zhu Jigui, Zhang Zili, et al. Situation and

development of large size measuring spatial coordinates research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(z1): 1-6. (in Chinese)

叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. 计量学报, 2008, 29(z1): 1-6.

[2] Wu B, Wang B. Automatic measurement in large-scale space with the laser theodolite and vision guiding technology [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, 5: 629385.

[3] Wu Bin, Yang Song. Research of measurement technology of non-orthogonal shaft laser theodolites [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 603-609. (in Chinese)

吴斌, 杨松. 非正交轴系激光经纬仪测量技术研究 [J]. 激光技术, 2015, 39(5): 603-609.

[4] Takatsuji T, Goto M, Kirita A, et al. The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(5): 477.

[5] Takatsuji T, Koseki Y, Goto M, et al. Laser-tracking interferometer system based on trilateration and a restriction on the position of its laser trackers [C]//SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3479: 319-326.

[6] Camboulives M, Lartigue C, Bourdet P, et al. Calibration of a 3D working space by multilateration [J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 163-170.

[7] Wendt K, Franke M, Härtig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers [J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2339-2345.

[8] Zhang Guoxiong, Lin Yongbin, Li Xinghua, et al. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(9): 1030-1036. (in Chinese)

张国雄, 林永兵, 李杏华, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1030-1036.

[9] Lin Yongbin, Zhang Guoxiong, Li Zhen, et al. Redundancy technology of multi-beam laser tracking interference 3D coordinate measuring system [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2003, 24(1): 1-5. (in Chinese)

林永兵, 张国雄, 李真, 等. 多路激光跟踪干涉三维坐标测量系统冗余技术[J]. 计量学报, 2003, 24(1): 1-5.

[10] Zhang Z, Hu H. Three-point method for measuring the geometric error components of linear and rotary axes based on sequential multilateration [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(9): 2801-2811.

[11] Zhuang H, Motaghedi S H, Roth Z S, et al. Calibration of multi-beam laser tracking systems [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, 19(4): 301-314.