

文章编号 1004-924X(2017)10-2752-07

激光跟踪仪的双面互瞄定向

林嘉睿¹, 孟 伟¹, 杨凌辉^{1*}, 高 扬¹, 张翼飞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. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 使用传统公共点定向方法很难在狭小、受限空间下完成对大尺寸测量仪器的定向, 故本文提出了一种受限空间下球坐标测量系统的双面互瞄定向方法, 并以激光跟踪仪为例进行了理论分析和实验验证。该方法结合激光跟踪仪的测量原理和使用特点, 通过激光跟踪仪本体测头的运动特性构建几何约束, 仅要求测量仪器之间相互可视, 便可依靠较小公共视场完成仪器定向。阐述了该方法的数学建模过程, 研究了定向优化算法, 并在上海光源环形测量控制网建立过程中进行了相关实验验证。结果表明: 该方法在仪器相距 5 m 以内时, 参考点转站误差优于 0.12 mm, 定向旋转角误差不超过 1.5"。与频繁转站的传统方法相比, 可在保证精度的同时, 极大地提高现场测量效率。该方法亦可推广应用于其它单站坐标测量系统。

关键词: 大尺寸测量仪器; 激光跟踪仪; 受限空间; 定向; 双面互瞄

中图分类号: TH821; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2752

Two-face reciprocal orientation for laser tracker

LIN Jia-rui¹, MENG Wei¹, YANG Ling-hui^{1*}, GAO Yang¹, ZHANG Yi-fei²

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,*
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)*

** Corresponding author, E-mail: icelinker@tju.edu.cn*

Abstract: As traditional orientation method depends heavily on measurement spaces and it is great difficult to implement the orientation of large dimension instruments in a limited space. Therefore, a two-face reciprocal orientation method was proposed to implement the orientation of a spherical coordinate measurement system in the limited space, and the theory analysis and experiment verification were performed by taking two laser trackers for example. With combination of measuring principle and working characteristics of laser trackers, the geometrical constraints of the method were constructed by motion characteristics of the probes in trackers. So, if the instruments to be measured were visible each other, they will be orientated by the smaller public view field. The mathematical modeling and optimization of this method were elaborated. Then, the experimental verification was performed on an establishment processing of circular measuring control network in Shanghai Synchrotron Radia-

收稿日期: 2017-05-09; 修订日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51405338, No. 51775380); 中国科协“青年人才托举工程”资助项目 (No. 2016QNRC001)

tion Facility(SSRF). The results indicate that the precision of the proposed method is within 0.12 mm and the orientation rotation angle error is less than 1.5" when the two laser trackers are 5m away from each other. As compared to that of traditional orientation method, the measuring efficiency of the method has been obviously promoted with almost the same precision level in a limited space. The method can also be applied to other single station coordinate measuring systems.

Key words: large-scale metrologic instrument; laser tracker; limited space; orientation; two-face reciprocal measurement

1 引言

大尺寸测量是几何量精密测量的重要组成部分,随着工业现代化的不断发展,大型机械装备和科学装置的制造和装配急需高效的现场数字化测量手段,基于多仪器/多站位的网络集成测量方法成为重点发展方向^[1-3]。作为典型的三维坐标测量系统,激光跟踪仪具有精度高、测量范围大和较好动态特性等优点,是目前大尺寸测量任务中应用最为广泛的测量仪器^[4-7]。在大型科学装置的装配校准过程中,激光跟踪仪作为精度基准担任着不可或缺的角色,如瑞士同步辐射光源、中科院北京正负电子对撞机、上海同步辐射光源以及中科院参与合作的三十米望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)等^[8-10]。但是,作为典型的单站式测量系统,激光跟踪仪的设备功能只能覆盖自身测量空间,需要频繁转站来解决空间遮挡等问题,不仅累积了测量误差,而且测量效率大大降低^[11-12]。以上海光源—大型粒子加速器为例,增强器周长 180 m,存储环周长达 432 m,而内部关键元件的定位精度需达到亚毫米量级才能保证光源准直精度^[13]。另一方面,上海光源是一个环形结构装置,利用激光跟踪仪构建测量控制网的过程中,跟踪仪站位间的测量空间非常有限,通视条件受限,需要布设足够多的跟踪仪站位才能完成测量任务。尤其在控制网日常维护任务时,环内、环外的坐标系统往往还需要通过环顶站位的布设才能完成坐标系转换工作,冗余测量站位可达 10 余站,频繁转站不仅造成精度损失,而且降低了测量效率,增加了测量成本。

研究表明,产生上述问题的关键在于所采用测量仪器定向方法的局限性。传统的仪器定向过程一般利用仪器共同观测的多组公共点(为了保证精度,公共点应达到 6 个以上且均匀分布于整

个测量空间),通过匹配算法,完成仪器测量坐标系的统一^[14]。然而在实际测量现场,可视空间往往不理想,无法观测足够多的公共点,导致仪器定向困难。例如在粒子加速器校准过程中,由于外部设备的不断安装,再加上装置本身结构复杂且窗口封闭,利用传统方法几乎无法完成定向过程,效率极低。

为解决复杂现场空间下测量仪器定向问题,本文结合上海光源测量控制网构建遇到的难题,提出了一种在狭小、受限空间下激光跟踪仪双面互瞄定向方法。该方法借鉴经纬仪的精准互瞄思路^[15],利用跟踪仪本体测头的运动特性构建几何约束,仅需要激光跟踪仪之间相互可视即可完成定向,并不需要很大的视场空间。结合在上海光源环内、外坐标系的统一问题,文中对所研究方法进行实验验证,结果显示:该方法可在保证转站精度的同时,显著提高测量控制网的构建效率。

2 激光跟踪仪双面互瞄定向原理

2.1 定向原理

如图 1 所示,定义两激光跟踪仪坐标系分别为 L_1 和 L_2 ,将带有标记点的测量球座附于各自激光跟踪仪的头部,相应接收标记点定义为 P_1 、 P_2 。

在图 1 第一状态下,两台激光跟踪仪都置于位姿 1,分别测量对方头部上的标记点坐标。记此时 P_2 在 L_1 坐标系的坐标为 P_2 。 P_1 在 L_2 坐标系下所测得坐标为 P_1 。在图 1 第二状态下, L_1 与 L_2 通过测头旋转切换到第二状态,并重复上述测量过程。图 2 展示了双面互瞄过程中激光跟踪仪头部变化的过程,激光跟踪仪的水平角和俯仰角都改变大约 180° 。记此时 P_2 在 L_1 坐标系中的相应坐标为 P_2' , P_1 在 L_2 坐标系中的坐标为 P_1' 。则 L_1 和 L_2 之间单位向量方向如下。

L_1 指向 L_2 原点的单位向量在 L_1 坐标系中表示为:

$$\mathbf{P}_{12} = (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1') / \|\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1'\|. \quad (1)$$

L_2 指向 L_1 原点的单位向量在 L_2 坐标系中表示为:

$$\mathbf{P}_{21} = (\mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2') / \|\mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2'\|. \quad (2)$$

定义两台激光跟踪仪通视路径上一点为 P_3 , 将 P_3 置于两跟踪仪之间靠近基线的位置。如图 1 外部第三点所示。两台激光跟踪仪分别测量目标点, P_3 在 L_1 坐标系中的坐标记为 ${}_{L_1}P_3$, 在 L_2 坐标系中的坐标记为 ${}_{L_2}P_3$ 。

为计算 L_1 和 L_2 之间的旋转矩阵, 构造两组相互正交的向量分别为

$$\mathbf{n}_1 = (\mathbf{P}_{12} \times {}_{L_1}P_3) / \|\mathbf{P}_{12} \times {}_{L_1}P_3\|, \quad (3)$$

$$\mathbf{m}_1 = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{P}_{12}$$

$$\mathbf{n}_2 = (-\mathbf{P}_{21} \times {}_{L_2}P_3) / \|\mathbf{P}_{21} \times {}_{L_2}P_3\|, \quad (4)$$

$$\mathbf{m}_2 = \mathbf{n}_2 \times -\mathbf{P}_{21}$$

\mathbf{P}_{12} 、 \mathbf{m}_1 、 \mathbf{n}_1 和 $-\mathbf{P}_{21}$ 、 \mathbf{m}_2 、 \mathbf{n}_2 均两两正交, 故 L_1 和 L_2 之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 可表示为:

$$\mathbf{R} = [-\mathbf{P}_{21} \quad \mathbf{m}_2 \quad \mathbf{n}_2] * [\mathbf{P}_{12} \quad \mathbf{m}_1 \quad \mathbf{n}_1]^T. \quad (5)$$

激光跟踪仪在测量前调平, 则 L_1 和 L_2 的 Z 轴平行, L_1 和 L_2 的定向可分解为 L_2 坐标系中 Z 轴的旋转角 θ 和平移向量 \mathbf{T} 。平移向量 \mathbf{T} 的方向定义为 \mathbf{P}_{12} , 通过计算 \mathbf{P}_{12} 在 XY 平面上的投影, 可以获得旋转角 θ 。记 \mathbf{P}_{12}' 为 \mathbf{P}_{12} 在 XY 平面上的投影, \mathbf{P}_{21}' 为 \mathbf{P}_{21} 在 XY 平面上的投影, 根据余弦定理, 则方位角可以表示为:

$$\theta = \arccos(\mathbf{P}_{12}'^T \mathbf{P}_{21}'), \quad (6)$$

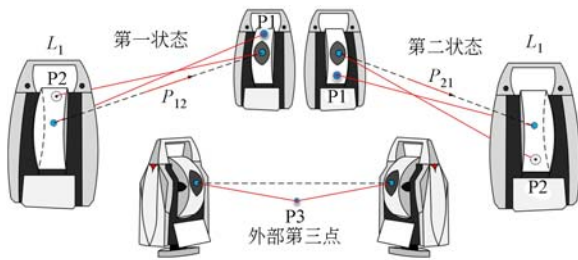


图 1 激光跟踪仪双面互瞄示意图

Fig. 1 Diagram of two-face reciprocal measurement for laser tracker

坐标系 L_1 和 L_2 之间的平移向量为:

$$\mathbf{T} = d \cdot \mathbf{P}_{21}, \quad (7)$$

其中, d 是 L_1 与 L_2 原点之间的距离。 d 的具体值由两激光跟踪仪对通视路径上的第三点的测量数据计算得到。

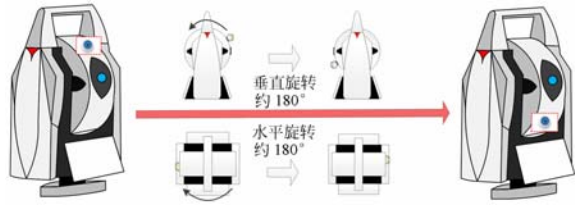


图 2 激光跟踪仪头部变化示意图

Fig. 2 Transformation of laser tracker's head

2.2 距离约束的建立

激光跟踪仪可得到被测点的球坐标, 如图 3 所示, P_3 与两中心点组成三角形。两台激光跟踪仪分别测量目标点, P_3 在 L_1 坐标系中的坐标记为 ${}_{L_1}P_3$, 在 L_2 坐标系中的坐标记为 ${}_{L_2}P_3$ 。基线与目标点方向的空间夹角可表示为向量的点积:

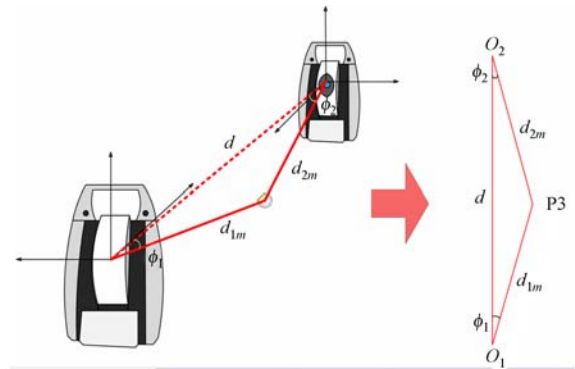


图 3 距离约束建立示意图

Fig. 3 Establishment of distance constraint

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \arccos(\mathbf{P}_{12} \cdot {}_{L_1}P_3 / \|\mathbf{P}_{12}\| \|\mathbf{P}_{12}'\|), \\ \phi_2 &= \arccos(\mathbf{P}_{21} \cdot {}_{L_2}P_3 / \|\mathbf{P}_{21}\| \|\mathbf{P}_{21}'\|), \end{aligned} \quad (8)$$

由余弦定理可得, 两跟踪仪的中心间距 d 为:

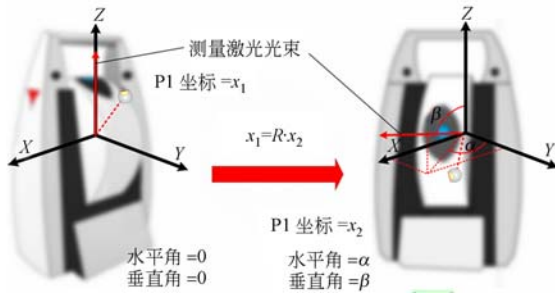
$$d = \sqrt{d_{1m}^2 + d_{2m}^2 - 2d_{1m}d_{2m}\cos(\pi - \phi_1 - \phi_2)}, \quad (9)$$

其中, d_{1m} 和 d_{2m} 分别为 L_1 和 L_2 原点到 P_3 之间的距离。

3 数学模型及优化

在上述过程中, 激光跟踪仪之间的位姿关系是依靠一个理论上不是完全最优的直接方法标定的。通过两组标记点求平均矢量的方法不能完全等同于两仪器原点之间矢量, 只有当仪器水平, 且标记点在激光跟踪仪旋转中心的垂直正上方时才完全等价。以下给出更精确的数学模型和优化方法。

设初始状态下 P_1 点在 L_1 坐标系下的坐标为 ${}_{L_1}^0P_1$, 且在这个状态下球坐标的水平角和垂直

图 4 L_1 坐标系中初始位置到旋转位置Fig. 4 Initial position in L_1 coordinate system to rotation position

角都是 0。同理,设 P_2 点在 L_2 坐标系下的坐标为 ${}^0_{L_2}P_2$ 。这两个坐标真值未知。

图 4 展示了标记点 P_1 在测量的过程中相对于初始状态水平角 α 和垂直角 β 的变换,相应的旋转矩阵为:

$${}_{L_1}R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & -\cos \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \beta & 0 & \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (10)$$

用球坐标表示测量结果,对于位姿 1 和激光跟踪仪 1 的坐标系 L_1 ,坐标 ${}^0_{L_2}P_2$ 可以转化为球坐标 (d_1, α_1, β_1) , d_1 表示标记点到跟踪仪坐标系原点之间的距离, α_1 是水平角, β_1 是垂直角,转换关系如下:

$${}^0_{L_2}P_2 = \begin{bmatrix} d_1 \sin \beta_1 \cos \alpha_1 \\ d_1 \sin \beta_1 \sin \alpha_1 \\ d_1 \cos \beta_1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

由此双面互瞄定向的过程中, L_1 坐标系下点 P_1 变换后的坐标为:

$${}^0_{L_1}P_1 = {}^0_{L_1}R \cdot {}^0_{L_1}P_1, \quad (12)$$

$${}^0_{L_1}R = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta_1 & 0 & -\cos \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \beta_1 & 0 & \sin \beta_1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

同理可得, ${}^0_{L_2}P_1$ 可以转化为球坐标 (d_2, α_2, β_2) , L_2 坐标系下点 P_2 变换后的坐标为:

$${}^0_{L_2}P_2 = {}^0_{L_2}R \cdot {}^0_{L_2}P_2, \quad (14)$$

$${}^0_{L_2}R = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta_2 & 0 & -\cos \beta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \beta_2 & 0 & \sin \beta_2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

同理在第二位姿的测量中, L_1 坐标系下点 P_1 变换后的坐标为:

$${}^0_{L_1}P_1 = {}^0_{L_1}R \cdot {}^0_{L_1}P_1, \quad (16)$$

L_2 坐标系下点 P_2 变换后的坐标为

$${}^0_{L_2}P_2 = {}^0_{L_2}R \cdot {}^0_{L_2}P_2. \quad (17)$$

变换矩阵 ${}^0_{L_1}R$ 和 ${}^0_{L_2}R$ 与姿态 2 中的角度值相关,同理 ${}^0_{L_1}R$ 和 ${}^0_{L_2}R$ 与姿态 1 中的角度值相关。

各点坐标之间的关系和两跟踪仪之间的定向参数表示如下:

$$\begin{cases} P_1 - R \cdot {}^0_{L_1}P_1 - T = 0 \\ {}^0_{L_2}P_2 - R \cdot P_2 - T = 0 \\ P_1' - R \cdot {}^0_{L_1}P_1 - T = 0 \\ {}^0_{L_2}P_2 - R \cdot P_2' - T = 0 \\ {}_{L_2}P_3 - R \cdot {}_{L_1}P_3 - T = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

消去公式(18)中的 ${}^0_{L_1}P_1$, ${}^0_{L_2}P_2$, ${}^0_{L_1}P_1$ 和 ${}^0_{L_2}P_2$,重新整理方程得:

$$\begin{cases} P_1 - R \cdot {}^0_{L_1}R \cdot {}^0_{L_1}P_1 - T = 0 \\ {}^0_{L_2}R \cdot {}^0_{L_2}P_2 - R \cdot P_2 - T = 0 \\ P_1' - R \cdot {}^0_{L_1}R \cdot {}^0_{L_1}P_1 - T = 0 \\ {}^0_{L_2}R \cdot {}^0_{L_2}P_2 - R \cdot P_2' - T = 0 \\ {}_{L_2}P_3 - R \cdot {}_{L_1}P_3 - T = 0 \end{cases}, \quad (20)$$

消去未知的坐标值 ${}^0_{L_1}P_1$ 和 ${}^0_{L_2}P_2$,最终简化后的方程为:

$$\begin{cases} {}^0_{L_1}R^T \cdot R^T (P_1 - T) - {}^0_{L_1}R^T \cdot R^T (P_1' - T) = 0 \\ {}^0_{L_2}R^T (R \cdot P_2 + T) - {}^0_{L_2}R^T (R \cdot P_2' + T) = 0 \\ {}_{L_2}P_3 - R \cdot {}_{L_1}P_3 - T = 0 \end{cases}. \quad (21)$$

再利用 L-M 算法求解未知参数^[16],以上文得到的结果作为优化方法的迭代初值。

4 实验验证

实验分为两部分,实验 1 为精度验证实验,在不同距离下对双面互瞄定向方法的精度评价,实验 2 为对比实验,进行传统定向方法和本文研究方法在上海光源实际任务下的精度和效率对比。

4.1 精度验证

实验设备为两台 Leica AT401 激光跟踪仪,搭建了由 3 个跟踪仪站位,19 个公共点构成的测



图 5 双面互瞄法定向实验

Fig. 5 Experimental scene of reciprocal orientation

量场,覆盖 10 m×10 m×3 m 的测量空间。以 1 号站位为基准,分别和 2 号站位(距离约 5 m),3 号站位(距离约 9 m)构成不同距离的互瞄定向实验,实验场景如图 5 所示。

评价采用两种方法:一是本文方法与传统公共点求解方法得到的定向参数直接比对,结果如表 1 所示;二是通过转站后的公共点空间坐标比对,得到该方法相对于传统方法的点位误差。以传统方法得到的 1 号站位下的点为评定标准,将成对的另一站位下的参考点通过本文方法得到的定向参数变换到 1 号站位下比对。结果如图 6 所示。

实验结果表明:通过双面互瞄定向得到的定向参数,有较高的精度。双面互瞄定向法与传统转站法在 5 m 距离时旋转角测量值相差不超过 1.5",9 m 距离不超过 1.8";直接比较点位误差,优化算法会使精度有一定提升,在仪器相距 5 m 的情况下公共点误差优于 0.12 mm,相距 9 m 情况下公共点误差优于 0.25 mm,受仪器距离影响较大,但完全能够满足工业现场应用对精度要达亚毫米级的要求。

表 1 定向参数对比

Tab. 1 Comparison of orientation parameters

评价方法	距离 /m	θ/rad	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm
传统方法	5	2.005 452	-1 102.986	-4 946.335	-103.578
	9	0.940 596	3 429.312	8 706.439	1.096
双面互瞄法	5	2.005 459	-1 102.969	-4 946.344	-103.521
	9	0.940 604	3 429.314	8 706.401	1.335
定向参数偏差	5	1.15"	0.017	-0.009	0.057
	9	1.74"	0.002	-0.038	0.239

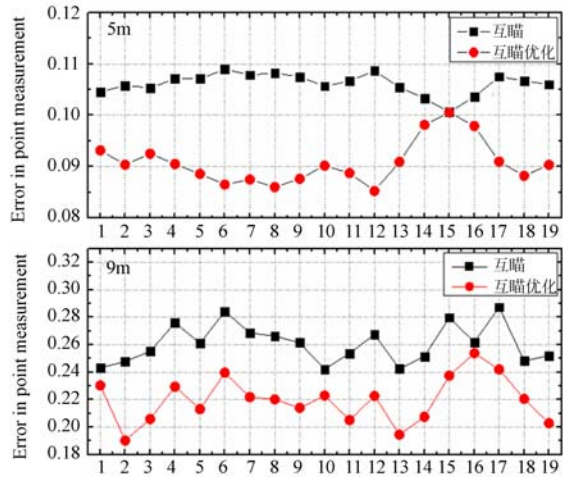


图 6 点位误差直接对比

Fig. 6 Comparison of error in point measurement

4.2 现场测量对比

在上海光源粒子加速器的测量控制网构建过程中,环外或光学棚屋控制点需要以环内坐标系作为基准。环内与环外由较厚的防辐射墙相隔。为了统一环内外测量控制网坐标基准,传统方法是通过打开环顶,在环顶设置额外站位转出坐标基准,由此产生的冗余站位可达 5~8 站,同时由于跟踪仪垂直角变化过大,测角误差通过冗余站位的累积,导致误差和组网效率都大大降低,如图 7 所示。

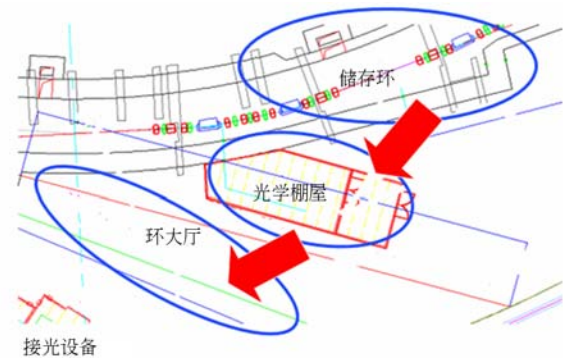


图 7 上海光源坐标基准变换示意图

Fig. 7 Coordinate transform reference in SSRF

实验同样采用 Leica AT401 激光跟踪仪,传统方法的测量站位和不确定度分析如图 8 所示,结果表明:经过环顶中转连接环内和环外,冗余测量站位可达 6 站,测量积累误差接近 0.147 mm。

考虑现场储存环内和环外、环内和光学棚屋之间都存在有小观察窗口互相连接,故利用本文

研究的方法进行了坐标基准变换,如图 9 所示。实验显示,在仪器处于狭小、受限的可视条件下,

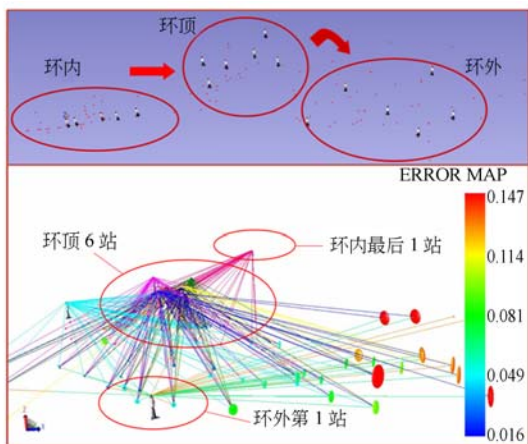


图 8 测量站位和不确定度分析

Fig. 8 Uncertainty analysis and position measurement

5 结 论

针对上海光源测量现场所遇到的问题,在仪器处于狭小、受限空间条件下,研究了一种激光跟踪仪双面互瞄定向方法。本文详细阐述了该方法理论数学模型和优化过程,进行了精度验证和现场测量结果比对,结果表明:该方法在仪器相距 5

仅需 2 个站位便能顺利完成定向工作。相比构建多个冗余站位,大幅度地提升了测量效率。



图 9 上海光源现场双面互瞄定向实验

Fig. 9 Experiment of two-face reciprocal orientation in SSRF

m 以内时,定向旋转角误差不超过 $1.5''$,参考点误差不超过 0.12 mm ,在现场受限视场空间下,大幅提升了测量效率。

该方法对于解决狭小、受限空间下的定向问题具有很高的适用性,也可将其推广应用于其它单站坐标测量系统,是对传统公共点坐标定向方法的良好补充。

参考文献:

- [1] KAGERMANN H, HELBIG J, HELLINGER A, *et al.*. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry[R]. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Federal Ministry of Education and Research, 2013.
- [2] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, *et al.*. Advances in large-scale metrology-review and future trends [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2016, 65(2): 643-665.
- [3] ZHANG D F, ROLT S, MAROPOULOS P G. Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(12): 2541-2547.
- [4] MURALIKRISHNAN B, PHILLIPS S, SAWYER D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: a review [J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 13-28.
- [5] 林嘉睿, 郭继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2): 463-468.
- [6] LIN J R, ZHU J G, ZHANG H L, *et al.*. Field evaluation of laser tracker angle measurement error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 463-468. (in Chinese)
- [7] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 309-318.
- [8] DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, *et al.*. Design of precise tracking system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 309-318. (in Chinese)
- [9] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1558-1564.
- [10] LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.*. Optoe-

- lectronic aiming and orientation system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [8] WEI F Q, DREYER K, UMBRICHT H. Status of the SLS alignment system[C]. *Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment*, IWAA, 2002.
- [9] 于成浩, 董岚, 柯明, 等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究[J]. *测绘科学*, 2008, 33(2): 42-44.
- YU CH H, DONG L, KE M, *et al.*. The plane accuracy research of 3D control network based on laser tracker in large-scale space[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(2): 42-44. (in Chinese)
- [10] HAN L C, ZHANG J X, YANG F, *et al.*. Estimation of the GSSM calibration error[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8884-8892.
- [11] MUELNER J E, CAI B, MAROPOULOS P G. Large-volume metrology instrument selection and measurability analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224(6): 853-868.
- [12] HUGHES B, FORBES A, LEWIS A, *et al.*. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4): 045103.
- [13] 于成浩, 柯明, 杜涵文, 等. 上海光源的一级平面控制网[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(10): 931-934.
- YU CH H, KE M, DU H W, *et al.*. Global horizontal control network of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(10): 931-934. (in Chinese)
- [14] REN Y, LIN J R, ZHU J G, *et al.*. Coordinate transformation uncertainty analysis in large-scale metrology[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(9): 2380-2388.
- [15] ALLAN A L. The principles of theodolite intersection systems [J]. *Survey Review*, 1988, 29(227): 226-234.
- [16] LOURAKIS M I A. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar[J]. *Foundation of Research and Technology*, 2005, 4(1): 1-6.

作者简介:



孟伟(1992—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士,2015年于天津大学取得学士学位,主要从事激光及光电测试、大尺寸测量等技术研究。E-mail: kevin_mengwei@tju.edu.cn

通讯作者:



杨凌辉(1981—),男,天津人,博士,讲师,2010年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电测试、大尺寸测量等技术研究。E-mail: icelinker@tju.edu.cn

导师简介:



林嘉睿(1984—),男,福建泉州人,博士,讲师,2012年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电测试、大尺寸测量等技术研究。E-mail: linjr@tju.edu.cn