

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107707

基于合作靶标的分布式测量系统定向方法^{*}

林嘉睿, 荆伟杰, 任永杰, 张 饶, 郝继贵

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘 要:大尺寸分布式测量系统基于多源观测交会原理,测量节点间的相对位姿关系决定了系统整体性能。工作空间测量定位系统是分布式测量系统的典型代表,其定向方法借助激光跟踪仪的靶球互换性构建几何约束条件,导致系统接收节点存在不可避免的对心误差,影响定向精度。本文研究了一种移动式合作靶标的分布式系统定向方法。通过设计集成多接收节点的合作靶标,无需精确确定靶标接收节点间的结构关系,而是利用接收节点间空间位置的相对不变性作为刚性约束来建立冗余光平面交会信息的基站相对位姿关系模型。结合后方交会定向初值解算模型,得到了不受接收节点互换对心误差影响的定向结果。最后以工作空间测量定位系统(wMPS)为实验验证平台,结果表明:此定向方法避免了靶球高精度互换性,具有较好的稳定性,能够有效降低接收节点互换对心误差的影响。与传统基准尺定向方法相比,此定向方法的基准长度测量精度提高了约40%。

关键词:分布式测量系统;系统定向;接收节点;对心误差;合作靶标

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Orientation method for distributed measurement system based on cooperative target

Lin Jiarui, Jing Weijie, Ren Yongjie, Zhang Rao, Zhu Jigui

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

Abstract: The large-scale distributed measurement system is based on the principle of intersection of multi-source observation. The relative position and pose relationship among the measurement nodes directly determines the overall performance of the system. The workspace Measurement Positioning System (wMPS) is a typical representative of distributed measurement systems. Its orientation methods rely on the interchangeability of target reflector of the laser tracker to construct geometric constraints, which results in inevitable centering error existing at the receiving node of the system and affects the orientation accuracy. This paper studies a distributed system orientation method based on mobile cooperative target. Through designing a cooperative target integrating multiple receiving nodes, there is no need to accurately determine the structural relationship among the target receiving nodes, but to use the relative invariance of the spatial positions of the receiving nodes as rigid constraints to establish the relative position and pose relationship model of the base station with redundant optical plane intersection information. Combined with the initial value calculation model of resection orientation, the orientation result that is not affected by the interchangeable centering error of the receiving node is obtained. Finally, wMPS is used as the experiment verification platform. The results show that this orientation method avoids the high-precision interchangeability of target reflector, has good stability and effectively decreases the influence of the interchangeable centering error of the receiving node. Compared with traditional orientation method using standard ruler, the reference length measurement accuracy of this orientation method is improved by about 40%.

Keywords: distributed measurement system; system orientation; receiving node; centering error; cooperative target

收稿日期:2021-04-02 Received Date: 2021-04-02

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51835007,51775380,51721003)项目资助

0 引言

数字化柔性协同、高效制造过程的实时信息获取对大尺寸测量技术提出了更高的要求^[1-2],分布式测量系统以其并行多任务、量程可拓展等特点,在大尺度精密测量中发挥越来越重要的作用^[3-4]。作为分布式测量系统的典型代表,室内空间测量定位系统具备全周多目标并行传感的测量特点,近几年发展十分迅速^[5]。

室内空间测量定位系统区分常规单站式测站工作模式,以精密旋转结合多路激光扫描系统,构建覆盖全周空间的广播式测量场节点(激光发射站),远端的接收节点(光电接收器)完成信源识别与处理功能,再通过测量节点形成多角度观测交会实现空间三维坐标测量。

接收节点的空间三维坐标需要依托能够精确确定目标位置信息的载体,往往与实际位置有所偏差。如激光跟踪仪的合作球形反射镜,其反射中心和外壳球心不完全重合,涉及外壳球度误差、棱镜光学对中误差等,能够导致测距产生偏差,从而造成空间三维坐标测量误差^[6-7]。近景摄影测量系统基于光束平差模型,其接收节点误差主要来源于反光标记点圆心的图像处理误差,导致光束约束或尺度基准产生偏差,最终反映在坐标测量结果中^[8-9]。而室内空间测量定位系统的接收节点误差反映在接收器光敏单元几何中心与外部工装精确对心上,同样会对坐标测量精度带来一定影响。

值得关注的是,激光跟踪仪作为目前大尺寸三维坐标测量精度最高的单站式仪器,往往作为空间几何约束的构建基准^[6]。而室内空间测量定位系统各个基站的相对位姿关系的精确确定往往通过基准设备提供的冗余几何约束,如基准长度和三维控制场^[10-11],来建立位姿参数优化目标函数,这些空间约束条件的确立依赖于精度更高的测量仪器^[12-14]。此时,系统定向误差受同尺寸靶标的互换性影响较大,如球形接收器与激光跟踪仪的反射靶球所产生的对心误差将会存在于室内空间测量定位系统的组网定向过程,从而影响最终测量精度。

本文基于室内空间测量定位系统高稳定性的旋转系统,研究了一种基于合作靶标的系统定向方法。通过设计内嵌 6 个光敏单元接收装置的合作靶标,无需标定靶标结构关系,以靶标上各个接收单元中心位置的空间相对距离不变为刚性约束条件,构建空间图形冗余约束,建立新型光面交汇位姿参数解算模型,避免了接收节点球

型工装互换对心误差的引入。最后以天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研制的 wMPS 系统为实验平台,对所研究定向方法进行了验证。

1 接收节点互换对心误差分析

1.1 系统测量原理及定向模型

工作空间测量定位系统(workshop measurement positioning system, wMPS)是一种基于精密光电扫描进行时间-空间变换的传感系统。激光测量站通过高稳定性轴系发射扫描旋转激光,接收器基于同步脉冲激光的光电脉冲间隔与转速信息识别信号来源,再通过同步-扫描光的相位关系解算旋转角度,从而实现空间角度信息变换,完成多角度交会定位。以工作空间测量定位系统 wMPS 为例^[10],多站光面交会测量原理如图 1 所示。

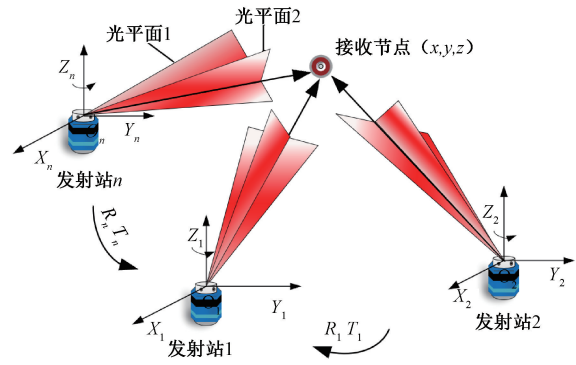


图 1 wMPS 交会测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wMPS intersection measurement

系统三维坐标测量过程可以简化为通过多个已知相对位姿关系的发射站,其扫描光平面在被测点处进行交会,可以通过式(1)所示的数学模型进行描述。

$$f_m(\theta_m, \mathbf{X}; \mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m) = 0 \quad (1)$$

其中, m 代表发射站序号; θ_m 代表被测点在各发射站光平面的旋转角度(观测值); $\mathbf{X} = [x, y, z]^T$ 代表被测点在全局坐标系下的坐标; $\mathbf{R}_m$ 和 $\mathbf{T}_m$ 为各发射站坐标系到全局坐标系的旋转、平移矩阵。

发射站扫描光平面自初始位置旋转一定角度后到达被测点,由发射站初始光平面参数进行相应的矩阵变换可以得到每个发射站形成的交会条件的具体形式^[11],以式(2)进行描述。

通过建立已定向($\mathbf{R}_m$ 和 $\mathbf{T}_m$ 已知)发射站下的式(2)方程,使用最优化方法即可求解得到被测点在全局坐标系下的坐标。

$$\begin{cases} h_{m1} = [a_{m1} & b_{m1} & c_{m1} & d_{m1}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\theta_{m1}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{T}_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \\ h_{m2} = [a_{m2} & b_{m2} & c_{m2} & d_{m2}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\theta_{m2}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{T}_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,系统定向参数 $\mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m$ 可以通过外部空间冗余几何约束特征,结合发射站角度观测值进行求解,如图 2 所示。

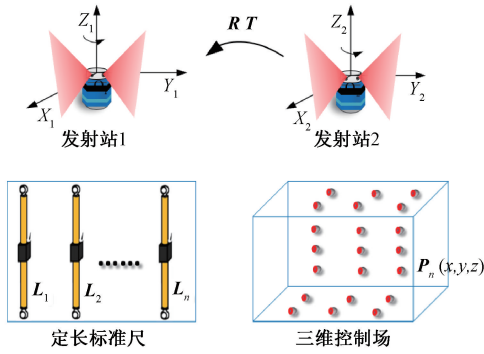


图 2 wMPS 定向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wMPS orientation

现有的定向模型以式(1)为目标函数,利用外罚函数法可以表示为式(3)的非线性无约束最优化问题:

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{T}, \mathbf{X}} F = \sum [f_i(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}; \mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m)]^2 + \lambda_1 \sum [h_j(\mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m)]^2 + \lambda_2 \sum [r_k(\mathbf{X})]^2 \quad (3)$$

其中, $f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}; \mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m)$ 为式(1)所描述的交会条件在多个空间被测点下的扩展; $h(\mathbf{R}_m, \mathbf{T}_m)$ 为待求解的定向参数的约束特性,常用的约束函数为旋转矩阵的正交约束条件。 $r(\mathbf{X})$ 为相应的定向方法约束特征,基准尺定向方法^[10]通过引入冗余基准长度解算定向参数, $r(\mathbf{X})$ 体现一维长度固定约束;后方交会定向方法通过引入三维控制场特征点解算定向参数, $r(\mathbf{X})$ 体现为特征点的三维坐标约束。

建立目标函数 F 后,选取相应的优化算法和迭代起点,即可求解系统定向参数 $\mathbf{R}_m$ 和 $\mathbf{T}_m$ 。

1.2 互换对心误差分析

定向方法约束特征利用精度更高的测量仪器精确确定相应的几何约束条件^[15-16]。wMPS 定向过程中往往将球型接收器和同尺寸激光跟踪仪靶球进行互换,则互换对心误差将会导致 wMPS 约束特征误差,最终导致定向参数的解算精度下降。

以基准尺定向方法为例分析互换对心误差对系统测量精度的影响。基准尺长真值为 L_0 (跟踪仪测量的两端靶球中心距离 P_1P_2), 而 wMPS 采集的尺长为 L (基准尺两端的接收器中心距离 M_1M_2), 如图 3 所示。

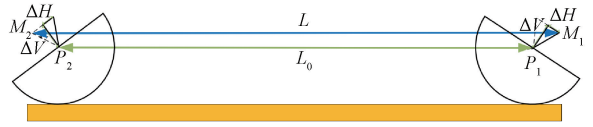


图 3 基准尺接收节点互换对心误差模型

Fig. 3 Interchangeable centering error model at the receiving nodes of the standard ruler

当接收节点互换对心误差存在时, $L \neq L_0$, 令尺长误差 $\alpha = L - L_0$ 。设置 α 取值范围为 $[-0.8 \ 0.8]$ (mm), 取值间隔为 0.2 mm, 设置系统单站角度测量精度为 $\pm 2''$ (测量区域的大小为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 与发射站的距离为 8 m)。定向完成后计算得到测量区域中相应的基准长度测量精度 r 。 r 与 α 的关系如图 4 所示。

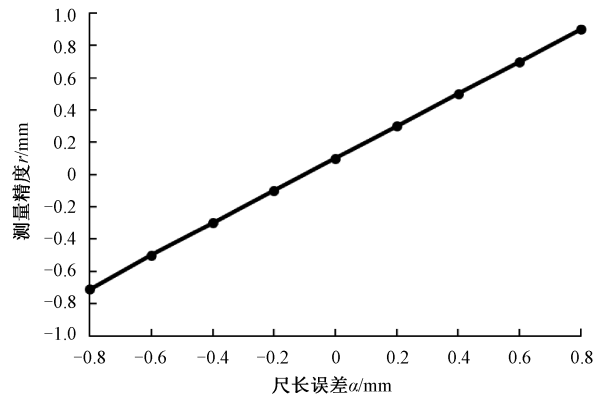


图 4 尺长误差 α 对测量精度 r 的影响

Fig. 4 Influence of ruler length error α on measurement accuracy r

其中尺长误差 α 为 0 时, 测量精度 r 为 0.10 mm, 主要由系统角度测量误差造成。由仿真结果可知, 测量精度与尺长误差呈现线性相关关系, $\pm 0.8 \text{ mm}$ 的尺长误差能够导致测量精度降低约 0.5 mm。

2 基于合作靶标的定向方法

为消除定向过程中接收节点互换对心误差带来的影响,本文研究了一种基于合作靶标的室内空间测量定位系统定向方法。所研究方法不需要对合作靶标上各接收单元中心位置进行精确确定,而是利用各中心位置空间相对距离不变的特性,移动靶标形成冗余的刚性约束条件,从而避免了靶球高精度互换性,消除定向过程中接收节点互换对心误差的影响。

2.1 定向方法原理

合作靶标的设计如图 5 所示,合作靶标由刚性固定在其外围的多个光电接收单元构成,呈立体均匀分布,靶标内部集成了信号处理单元和无线通信模块。靶标坐标系 $O-X_B Y_B Z_B$ 定义如图 5 所示,接收单元中心位置在靶标坐标系下的坐标定义为靶标内参。

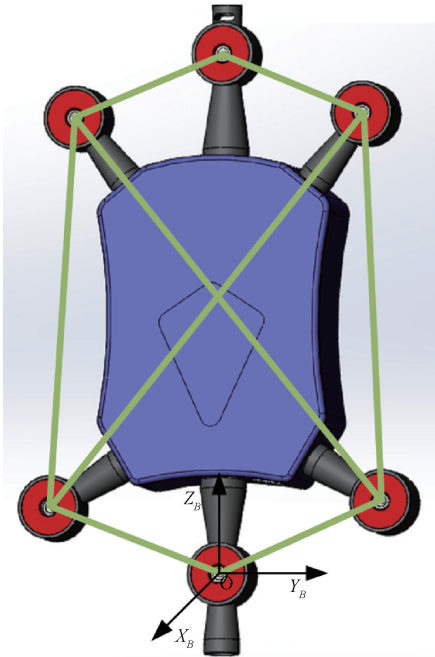


图 5 合作靶标

Fig. 5 Cooperative target

为便于分析系统定向参数的解算过程,设合作靶标上安装 n 个接收单元,定向过程中靶标在空间中自由移动了 m 个靶位,待定向的发射站数量为 p ,如图 6 所示。

在 p 个发射站的定向过程中,将发射站 1 作为主站,主站坐标系为全局测量坐标系。

设 m 个靶位处靶标坐标系到主站坐标系下的旋转矩阵为 R_{Bi} 、平移矩阵为 T_{Bi} ($i = 1 \sim m$);而主站坐标系到发射站 p 坐标系的旋转矩阵为 R 、平移矩阵为 T , R 与 T 即

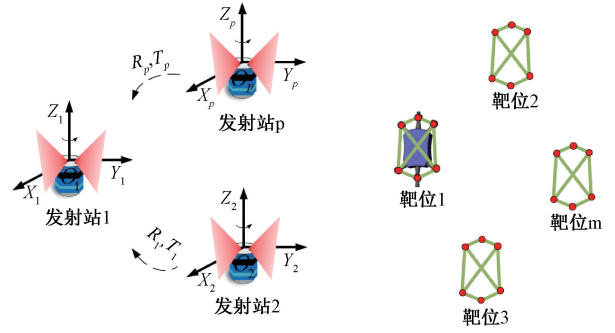


图 6 合作靶标定向示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cooperative target orientation

待为求解的定向参数。设 n 个接收单元中心位置在靶标坐标系下坐标 (靶标内参 P_b) 为 (x_{Bj}, y_{Bj}, z_{Bj}) ($j = 1 \sim n$), m 个靶位处 n 个接收单元中心位置在主站坐标系下的坐标为 $(x_{1ij}, y_{1ij}, z_{1ij})$, 在发射站 p 坐标系下的坐标为 $(x_{pij}, y_{pij}, z_{pij})$ 。则有:

$$\begin{cases} (x_{1ij}, y_{1ij}, z_{1ij})^T = R_{Bi} \cdot (x_{Bj}, y_{Bj}, z_{Bj})^T + T_{Bi} \\ (x_{pij}, y_{pij}, z_{pij})^T = R \cdot (x_{1ij}, y_{1ij}, z_{1ij})^T + T \end{cases} \quad (4)$$

由已知的每个发射站初始光平面参数 $[a_k, b_k, c_k, d_k]^T$ ($k = 1, 2$) 和扫描角度 θ_{ijk} 得 m 个靶位处 n 个接收单元对应的光平面法向量:

$$n_{ijk} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ijk} & -\sin \theta_{ijk} & 0 \\ \sin \theta_{ijk} & \cos \theta_{ijk} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_k \\ b_k \\ c_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, n_{ijk} 表示第 i 靶位下第 j 个接收单元所获取的每个发射站的第 k 个光平面的法向量 ($i = 1 \sim m; j = 1 \sim n; k = 1, 2$)。

根据交会条件式(2)得到发射站 1 和发射站 p 的光平面约束方程:

$$\begin{cases} F_{ijk} = (x_{1ij}, y_{1ij}, z_{1ij}) \cdot n_{ijk} + d_k = 0 \\ F_{ijk} = (x_{pij}, y_{pij}, z_{pij}) \cdot n_{ijk} + d_k = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则求解定向参数 R 与 T 的目标函数可表示:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 F_{ijk}^2 \quad (7)$$

其中, F 的决策变量 R_{Bi} 、 R 还必须满足旋转矩阵正交性约束条件:

$$\begin{cases} f_i = \|R_{Bi}\| - 1 = 0 \\ f = \|R\| - 1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

最后,利用靶标上各接收单元中心位置空间相对距离不变的特征建立刚性约束条件,接收单元中心位置间距 r_{ij} 可表示:

$$r_{ij} = \|(x_{1ij}, y_{1ij}, z_{1ij})^T - (x_{1(i+1)j}, y_{1(i+1)j}, z_{1(i+1)j})^T\| \quad (9)$$

则刚性约束条件可以表示:

$$g_{ij} = r_{ij} - r_{(i+1)j} = 0 \quad (10)$$

本文采用外罚函数法将此有约束问题转换为无约束

问题进行迭代求解。

由上述分析构造的非线性无约束目标函数为:

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 F_{ijk}^2 + p_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^m f_i^2 + f^2 \right) + p_2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij}^2 \quad (11)$$

其中, p_1, p_2 为罚函数因子。由方程数目大于未知量数目的条件知, 当满足式(12):

$$5nm - 6m - 4n \geq 6 \quad (12)$$

最优化问题 $\min M$ 存在最优解。

2.2 迭代算法及初值求解

本文采取 L-M 算法对目标函数式(11)进行优化求解。为提高解算精度和效率、避免陷入局部极值, 本文基于合作靶标多接收单元的特点, 建立了准确的初值求解模型。在单站测角模型^[11]中利用后方交会原理^[17]可得到 R_{B_i}, T_{B_i} 较为准确的初值, 如图7所示。

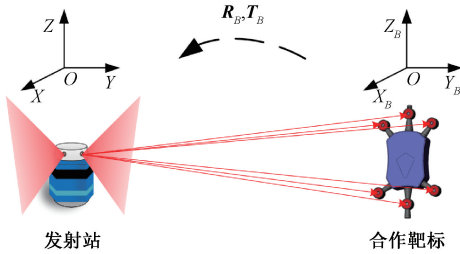


图7 单发射站后方交会定向示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a single transmitter resection orientation

3 验证实验

以天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研发的室内空间测量定位系统 wMPS 为实验平台, 分析了所研究方法对接收节点互换对心误差的抑制程度和定向后的测量精度。实验场景如图8所示。

实验平台主要由两台激光发射站(单站角度测量精度为 $\pm 2''$)、基准尺、激光跟踪仪(Leica AT901-LR)和合作靶标组成。结合式(12)和初值求解模型, 靶标上接收单元的数目设计为6个($n=6$), 实验中合作靶标移动6次($m=6$)。

实验流程如下: 将激光跟踪仪(用于标定基准尺长度)、两台发射站固定, 保证发射站间距不小于3 m; 在测量区域(区域空间为3 m×5 m×3 m, 距离发射站约5 m)中将合作靶标前后移动6个靶位, 每个靶位由合作靶标上各接收单元采集光平面信号来解算系统定向参数; 对比传统定向方法, 将由跟踪仪标定后的基准尺(存在互换对心误差)在同样空间中前后移动8个尺位, 每个尺位由基准尺两端接收单元采集光平面信号来解算系统定向参



图8 定向实验

Fig. 8 Orientation experiment

数。重复合作靶标验证实验3次, 每次在测量区域中选取的靶位各不相同, 并保持其他实验参数和程序不变, 实验基站、靶标、基准尺的站位在 XOY 平面的分布如图9所示。

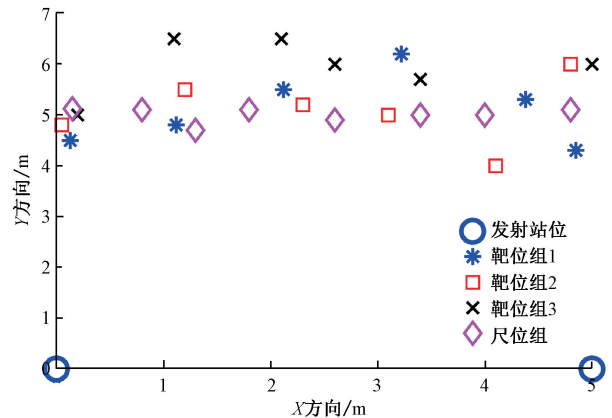


图9 XOY 平面实验布局

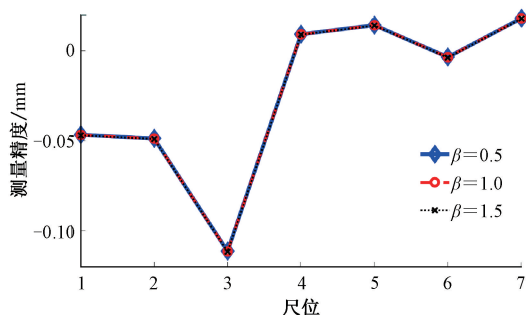
Fig. 9 The experiment layout on XOY plane

3.1 实验分析

将多组带有不同误差的靶标内参初值 P_{b0} 作为定向方法模型的输入量, 以模拟不同大小互换对心误差对所研究定向方法的影响, 其中互换对心误差比例因子 β 的定义为带有互换对心误差的靶标上接收单元间距与间距真值比值。

$$\beta = \frac{\| (x'_{B(j+1)}, y'_{B(j+1)}, z'_{B(j+1)})^T - (x'_{B_j}, y'_{B_j}, z'_{B_j})^T \|}{\| (x_{B(j+1)}, y_{B(j+1)}, z_{B(j+1)})^T - (x_{B_j}, y_{B_j}, z_{B_j})^T \|} \quad (13)$$

β 对基准长度测量精度的影响如图10所示。实际上 β 是一个微量, 一般在 $[0.5, 1.5]$ 范围内变化。由图10可知, 3组基准长度测量精度的变化量在 ± 0.01 mm 以内, 其变化曲线几乎重合。上述分析表明: wMPS 系统

图 10 β 对基准长度测量精度的影响Fig. 10 Influence of β on the measurement accuracy of the reference length

通过所研究方法定向后的测量精度不受互换对心误差的影响。

3.2 合作靶标定向精度验证

定向完成后以测量区域内 7 组基准长度测量误差作为相应定向方法测量精度的评价标准,得到 3 组合作靶标定向和一组基准尺定向的基准长度测量精度对比结果,如图 11 所示。

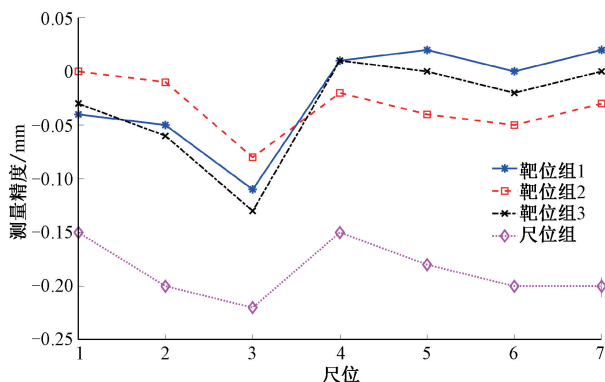


图 11 基准长度测量精度

Fig. 11 Measurement accuracy of the reference length

对于分布式测量系统而言,标定空间的靶标位置变化会导致测量精度略有差异。由图 11 可知,所研究方法稳定性较好,wMPS 经该方法定向后的基准长度测量精度优于 0.13 mm,与传统基准尺定向方法相比提高了约 40%。

4 结 论

针对大尺寸空间三维坐标分布式测量系统中存在的接收节点互换对心误差问题,研究了一种基于合作靶标的系统定向方法。以靶标上各接收单元中心位置空间相

对距离不变为刚性约束条件,基于室内空间测量定位系统的高稳定测角性能构建合作靶标空间冗余约束条件,建立优化定向参数解算模型。以 wMPS 为实验平台,系统定向实验结果表明,所研究方法基本消除了接收节点互换对心误差对系统定向的影响。后续研究将关注合作靶标站位布局 and 测量适应性优化等方面。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 樊印久, 张福民, 曲兴华, 等. 海洋工程装备制造现场大尺寸组网测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 369-376.
FAN Y J, ZHANG F M, QU X H, et al. Large-scale network measurement in the field of marine engineering equipment manufacturing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (3): 369-376.
- [3] 吴荣, 刘依, 周建民. 数字图像相关用于测量风电叶片全场变形[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 258-264.
WU R, LIU Y, ZHOU J M. Full-field deformation measurement of wind turbine blades using digital image correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 258-264.
- [4] 刘巍, 李肖, 马鑫, 等. 采用复合式靶标的近景大视场相机标定方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 230-236.
LIU W, LI X, MA X, et al. Camera calibration method for close range large field of view camera based on compound target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 230-236.
- [5] XIONG C, BAI H, LIN J. Potential of workshop measurement positioning system to measure oscillation frequencies of rigid structures [J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 595.
- [6] MURALIKRISHNAN B, PHILLIPS S, SAWYER D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 13-28.
- [7] WANG M, LI D, ZHAO Y. Iterative alignment of reflector panels for large-scale compact test range in non-metrology environment based on laser tracker[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(4): 045002.
- [8] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020,

- 47(3): 242-249.
- LU X D, XUE J P, ZHANG Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 242-249.
- [9] 单宝华, 袁文厅, 刘洋. 一种基于实心圆靶标的立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 233-242.
- SHAN B H, YUAN W T, LIU Y. A calibration method for stereovision system based on solid circle target[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 233-242.
- [10] 杨凌辉, 郝继贵, 张广军, 等. 采用标准尺的工作空间测量定位系统定向方法[J]. 天津大学学报, 2012(9): 814-819.
- YANG L H, ZHU J G, ZHANG G J, et al. Orientation method for workspace measurement positioning system based on scale bar[J]. Journal of Tianjin University, 2012(9): 814-819.
- [11] LIU Z, ZHU J, YANG L, et al. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105004.
- [12] ZHANG X, XU Y, LI H, et al. Flexible method for accurate calibration of large-scale vision metrology system based on virtual 3-D targets and laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(6): 172988141989351.
- [13] 韩龙, 汪增福. 基于几何约束的高精度特征点检测和相机标定[J]. 中国科学技术大学学报, 2008(10): 1211-1217.
- HAN L, WANG Z F. High precision feature detection and camera calibration based on geometrical constraint[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008(10): 1211-1217.
- [14] 李巍, 董明利, 孙鹏, 等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2053-2060.
- LI W, DONG M L, SUN P, et al. Relative orientation method for large-scale photogrammetry with local parameter optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2053-2060.
- [15] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] YU L, HAN Y, NIE H, et al. A calibration method based on virtual large planar target for cameras with large FOV[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 67-77.
- [17] 陈继华, 孙荣旭, 张斌. 单像空间后方交会算法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 272-277.
- CHEN J H, SUN R X, ZHANG B. A new algorithm for single image space based resection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 272-277.

作者简介



林嘉睿 (通信作者), 2012 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授。主要研究方向为激光及光电测试、大尺寸精密测量技术。

E-mail: linjr@tju.edu.cn

Lin Jiarui (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2012. Now, he is an associate professor in Tianjin University. His main research interest includes laser and photoelectric testing technology, and large-scale precision measurement.



荆伟杰, 2019 年于天津大学精密仪器与光电子工程学院获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向是大尺寸精密测量技术。

E-mail: 16622033193@163.com

Jing Weijie received his B. Sc. degree from School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University in 2019. Now, he is an M. Sc. candidate in Tianjin University. His main research interest is large-scale precision measurement.