

DOI 10.13494/j.npe.20160074

倾敏, 林嘉睿, 郭思阳, 等. 基于后方交会的室内空间测量定位系统定向方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(6): 473-479.

Qing Min, Lin Jiarui, Guo Siyang, et al. Orientation method for workspace measuring and positioning system based on resection [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(6): 473-479 (in Chinese)

基于后方交会的室内空间测量定位系统定向方法

倾敏, 林嘉睿, 郭思阳, 杨凌辉, 任永杰

(精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为了实现室内空间测量定位系统(wMPS)发射站定向参数的快速、精确校准, 提高其方法的适应性, 研究了一种新的发射站定向方法. 本方法借鉴工程测量中的后方交会原理, 在wMPS发射站数学模型基础上, 引入坐标控制场建立冗余光平面约束, 得出参数优化函数. 通过拉格朗日乘子法求取定向参数初值, 进行优化解算. 本方法可以实现发射站的自动定向. 搭建了实验平台并以激光跟踪仪测量结果作为比对基准, 验证了校准方法的准确性. 由本方法完成定向的wMPS测量点误差优于 ± 0.3 mm, 且满足大尺寸坐标测量的精度要求.

关键词: 室内空间测量定位系统; 定向参数; 后方交会; 校准

中图分类号: TN247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6030(2017)06-0473-07

Orientation Method for Workspace Measuring and Positioning System Based on Resection

Qing Min, Lin Jiarui, Guo Siyang, Yang Linghui, Ren Yongjie

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

Abstract: To rapidly and precisely calibrate the orientation parameters of transmitter in workspace measuring and positioning system (wMPS), a new calibration method is proposed which is more adaptable in application. Referring to the principle of resection from engineering measurement, the method provides the light-plane constraints and sets up the adjusted equations by introducing coordinate control field on the basis of mathematical model of wMPS transmitter. Initial values are calculated by the Lagrangian multiplier method and the final results are solved. This method can realize the automatic orientation of wMPS transmitter. To verify the feasibility of this method, an experiment platform was set up, and the laser tracker was taken as reference to be compared. The wMPS calibrated by this method has an error of point position better than ± 0.3 mm, satisfying the precision requirement of large scale coordinate measurement.

Keywords: workspace measuring and positioning system (wMPS); orientation parameter; resection; calibration

室内空间测量定位系统(workspace measuring and positioning system, wMPS)是针对大型设备的制造装配过程中精确测量和定位需求而发展出的一种大尺寸坐

标测量系统. 目前, 国外发展较为成熟的系统有尼康公司生产的iGPS测量系统^[1], 在20 m测量范围内其坐标测量精确度可达0.2 mm^[2]. 国内天津大学Zhu等^[3]

收稿日期: 2017-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305297, 51405338); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2013YQ35074702).

作者简介: 倾敏(1990—), 男, 硕士研究生.

通讯作者: 林嘉睿, 讲师, linjr@tju.edu.cn.

已对该领域进行深入研究并研制出了 wMPS 相关样机。该系统的坐标测量核心原理为基于空间内多发射站的角度交会原理。该系统的特点有以下几点。① wMPS 中的激光信号经过发射站发出、接收器探测、前方处理器与上位机的逐层信号处理和传输,最终解算得出接收器坐标。这种信息的单向传输使得该系统可以满足多用户同时测量的应用需求^[4]。②通过合理的技术应用^[5],wMPS 实现了角度的自动测量,极大提高了测量效率。③针对不同的测量场景,可以根据现场具体情况灵活布置 wMPS 内各发射站位置,使得该系统具有很强的适应性。目前,wMPS 已被广泛应用于飞机、轮船等的大型部件或设备的制造及装配过程^[6-8]。

在对大体积、大重量目标进行测量时,由于测量目标不便移动,因此需要 wMPS 能够满足在线测量的要求,对工业现场的复杂扰动具有适应性。此外,由于测量所得结果通常为生产或装配的下一步实施提供指导,因此对 wMPS 的整体工作效率具有一定要求。wMPS 工作前,需要准确标定出系统内发射站与系统测量坐标系间的相对位姿关系^[9],这一过程也称为发射站定向。实践经验表明,发射站定向所用时间(即定向效率)对系统的工作效率具有较大影响。因此,为适应复杂多样的 wMPS 应用场合,提高定向效率,研究一种精度满足要求、操作复杂性低、复杂环境适应性强、自动化程度高的 wMPS 发射站定向方法对于 wMPS 的发展具有重要的意义。

随着 wMPS 相关研究的积累,一些较为实用的 wMPS 发射站定向方法已经得到了发展。采用标准尺的 wMPS 定向方法^[10]是一种利用发射站工作时水平安置的特点和空间中两点的距离约束对发射站定向参数进行求解的方法。经过该方法标定的 wMPS 的标准尺长度解算误差优于 0.25 mm,满足精度要求且具有一定的便利性。然而,该定向过程中需要在测量空间内多个位置移动标准尺,这对于标定空间的通透性和开阔性均有要求,不适用于测量空间工装摆放复杂、阻挡多、开阔性差的应用场合。基于互瞄技术的 wMPS 定向参数自动标定方法^[11]是一种利用具有附加靶标的发射站进行互瞄以完成发射站定向的方法。使用该方法完成定向的 wMPS 的坐标测量误差优于 0.6 mm,基本满足应用要求。对靶标在发射站坐标系下完成坐标标定的前提下,该方法通过发射站互瞄即可完成定向,进一步提高了自动化程度。然而,该方法具有以下缺陷:①该方法要求靶球连线与发射站转轴平行,且二者均需竖直,使其实现过程增加了标定难度;②该方法仅局限于把各发射站定向于某一个发射站下,需要转站才能与外部测量设备建立关系,而这会引入误差。

基于 wMPS 发射站定向技术现状,借鉴工程测量领域的后方交会原理思想,本文研究了一种基于后方交会原理的发射站快速定向方法。本方法中,仅需使待定向发射站扫描控制点,即可实现发射站的快速高精度定向。本方法采用可以灵活布置的控制场,且不需要基准尺等其他外部设备参与,从而降低了对空间的需求,提高了空间受限场合适应性。另外,本方法解算结果为发射站与控制场坐标系的定向关系,而控制场坐标系可以由测量坐标系定义,故在组网时,可以避免坐标系转换,从而提高效率和精度。

本文在对 wMPS 发射站模型进行研究的基础上,建立了定向参数校准模型,借助光平面约束条件推导了目标函数及解算初值的求解方法。实验中,以天津大学自主研制的 wMPS 为实验平台,以高精度的激光跟踪仪作为测量基准,对本快速校准方法的精确度进行了验证。

1 wMPS 激光发射站数学模型

wMPS 激光发射站结构及坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 定义如图 1(a)所示,其实物如图 1(b)所示,坐标系以旋转轴为 Z_T 轴,设转台处于初始位置时 X_T 轴经过扫描光平面 1,坐标系符合右手定则。

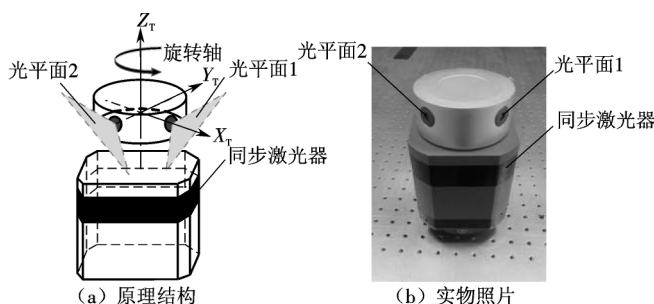


图1 wMPS 发射站原理结构及实物照片

Fig.1 Structure and physical image of wMPS transmitter

激光发射站由固定的站体和由站体内电机驱动的转台组成。发射站转台带动两夹角一定的扇形扫描光平面旋转^[12]。每转动到初始位置,转台发射同步光信号。光电接收器可以探测和分辨同步光信号与扫描光信号,并根据探测时间差计算光平面的旋转角度。由光电接收器信号计算出的扫描周期和各光平面时间差分别为 T 和 T_1 、 T_2 ,wMPS 发射站光平面扫描示意图 2。

wMPS 前端处理器对接收器收到的信号进行处理,计算出接收器探测到同步光信号和两个扫描光平面 1、2 的信号的时间间隔 T_1 、 T_2 。结合发射站转速所决定的发射站旋转周期 T 根据式(1),即可推导出两扫

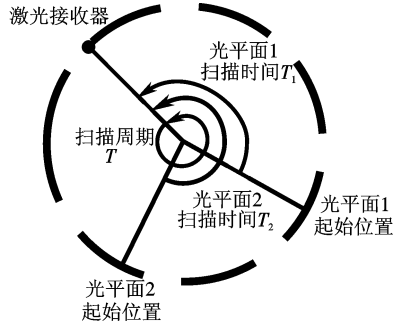


图 2 wMPS 发射站光平面扫描示意

Fig. 2 Schematic diagram of optical plane scanning of wMPS transmitter

描光从初始位置旋转到球形接收器光学中心处所转过的角度 θ_1 和 θ_2 [13-14] 分别为

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 2\pi(T_1/T) \\ \theta_2 &= 2\pi(T_2/T)\end{aligned}\quad (1)$$

发射站模型可以抽象理解为围绕其坐标系 Z 轴以一定速率旋转的两个扇形扫描光平面. 光平面在初始位置处的结构参数 (a_i, b_i, c_i, d_i) 称作发射站内部参数, 可通过一定方法准确标定获得 [14]. 则当某扇形扫描光旋转到任意位置处时, 其在发射站坐标系下的法向量 $(a_{\theta_i}, b_{\theta_i}, c_{\theta_i})$ 可通过如下运算获得:

$$\begin{bmatrix} a_{\theta_i} \\ b_{\theta_i} \\ c_{\theta_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix}\quad (2)$$

式中 $i=1, 2$. 又因为绕 Z_T 旋转过程中光平面与 Z_T 的截距不变, 故 $d_{\theta_i} = d_i$.

2 发射站后方交会方法定向校准原理

后方交会原理已被广泛应用于全站仪坐标测量系统、数字相机近景摄影测量 [15] 等领域, 也可称为单像

空间后方交会原理. 将其多靶标对应单一相机的标定思想拓展到 wMPS 的多控制点对应单个发射站模型中, 就可得出如图 3 所示发射站后方交会定向原理.

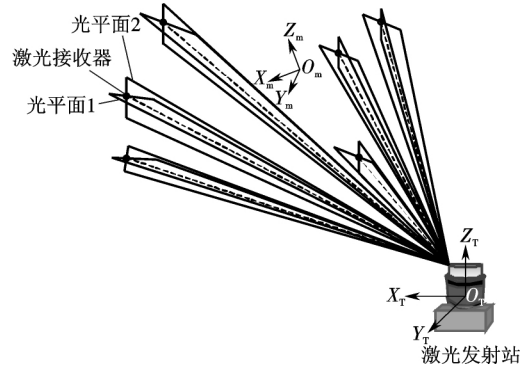


图 3 发射站后方交会定向原理示意

Fig. 3 Orientation principle diagram of spatial resection of transmitter

根据图 3 原理, 发射站的定向模型描述如下: 设其中一个控制点在全局测量坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 中坐标为 (x_M, y_M, z_M) . 另外, 对于每个控制点, 都有两个光平面对其位置进行约束. 设待校准的定向参数为 (α, β, γ) 和 (t_x, t_y, t_z) , 并设其对应旋转和平移矩阵分别为 R 和 T .

经过坐标系转换可得该控制点在发射站坐标系 $O-X_T Y_T Z_T$ 下的坐标 (x_T, y_T, z_T) 为

$$\begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T \end{bmatrix}^T = R \begin{bmatrix} x_M & y_M & z_M \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix}^T\quad (3)$$

可得该控制点对应的光平面约束方程为

$$\begin{cases} a_{\theta_1} x_T + b_{\theta_1} y_T + c_{\theta_1} z_T + d_{\theta_1} = 0 \\ a_{\theta_2} x_T + b_{\theta_2} y_T + c_{\theta_2} z_T + d_{\theta_2} = 0 \end{cases}\quad (4)$$

结合式 (2), 联立所有控制点 (设总数为 n) 所对应光平面约束方程, 得光平面约束方程组为

$$\begin{cases} F_{i1} = [a_1 & b_1 & c_1 & d_1] \begin{bmatrix} \cos \theta_{i1} & \sin \theta_{i1} & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{i1} & \cos \theta_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{iM} & y_{iM} & z_{iM} & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}^T \right) = 0 \\ F_{i2} = [a_2 & b_2 & c_2 & d_2] \begin{bmatrix} \cos \theta_{i2} & \sin \theta_{i2} & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{i2} & \cos \theta_{i2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{iM} & y_{iM} & z_{iM} & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}^T \right) = 0 \end{cases}\quad (5)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n$.

从而得到发射站定向参数标定优化目标函数为

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 F_{ik}^2\quad (6)$$

式(6)所描述的目标方程属于非线性无约束优化问题. 通常情况下, 求解这种问题可以采用如下算法: ①通过一定方法或手段确定迭代初始值; ②构造下降方向; ③计算迭代步长. 根据对于下降方向和步长的不同选择策略, 非线性优化算法具有不同的种类, 如最速下降法、牛顿法、列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt L-M)法等. 其中, L-M 算法综合了牛顿法与最速下降法的优点, 具有下降速度快、算法稳定性好、不易收敛于局部最优解的优点^[16]. 因此本文选择 L-M 算法为求解非线性约束问题的方法.

由于所求的定向参数个数为6, 故理论上至少需要3个控制点, 构成6个约束方程才能进行求解. 考虑到结构参数标定、接收器测角误差以及控制点坐标测量误差, 需要引入一定数量的控制点以提供冗余约束, 从而提高校准精确度.

$$A = \begin{bmatrix} a_{1\theta_1}x_{1M} & a_{1\theta_1}y_{1M} & a_{1\theta_1}z_{1M} & b_{1\theta_1}x_{1M} & b_{1\theta_1}y_{1M} & b_{1\theta_1}z_{1M} & c_{1\theta_1}x_{1M} & c_{1\theta_1}y_{1M} & c_{1\theta_1}z_{1M} & a_{1\theta_1} & b_{1\theta_1} & c_{1\theta_1} \\ a_{1\theta_2}x_{1M} & a_{1\theta_2}y_{1M} & a_{1\theta_2}z_{1M} & b_{1\theta_2}x_{1M} & b_{1\theta_2}y_{1M} & b_{1\theta_2}z_{1M} & c_{1\theta_2}x_{1M} & c_{1\theta_2}y_{1M} & c_{1\theta_2}z_{1M} & a_{1\theta_2} & b_{1\theta_2} & c_{1\theta_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n\theta_1}x_{nM} & a_{n\theta_1}y_{nM} & a_{n\theta_1}z_{nM} & b_{n\theta_1}x_{nM} & b_{n\theta_1}y_{nM} & b_{n\theta_1}z_{nM} & c_{n\theta_1}x_{nM} & c_{n\theta_1}y_{nM} & c_{n\theta_1}z_{nM} & a_{n\theta_1} & b_{n\theta_1} & c_{n\theta_1} \\ a_{n\theta_2}x_{nM} & a_{n\theta_2}y_{nM} & a_{n\theta_2}z_{nM} & b_{n\theta_2}x_{nM} & b_{n\theta_2}y_{nM} & b_{n\theta_2}z_{nM} & c_{n\theta_2}x_{nM} & c_{n\theta_2}y_{nM} & c_{n\theta_2}z_{nM} & a_{n\theta_2} & b_{n\theta_2} & c_{n\theta_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$X = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{31} \ r_{32} \ r_{33} \ t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (8)$$

$$D = [-d_{1\theta_1} \ -d_{1\theta_2} \ \cdots \ -d_{n\theta_1} \ -d_{n\theta_2}]^T \quad (9)$$

根据坐标系定义, 发射站光平面1经过 X_T 轴. 故式(9)中 $d_{i\theta_1}$ ($i=0, 1, \cdots, n$)均为0. 而对于 $d_{i\theta_2}$ ($i=0, 1, \cdots, n$)经过发射站制造过程中的装配调整环节, 可

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{1\theta_1}x_{1M} & a_{1\theta_1}y_{1M} & a_{1\theta_1}z_{1M} & b_{1\theta_1}x_{1M} & b_{1\theta_1}y_{1M} & b_{1\theta_1}z_{1M} & a_{1\theta_1} & b_{1\theta_1} & c_{1\theta_1} \\ a_{1\theta_2}x_{1M} & a_{1\theta_2}y_{1M} & a_{1\theta_2}z_{1M} & b_{1\theta_2}x_{1M} & b_{1\theta_2}y_{1M} & b_{1\theta_2}z_{1M} & a_{1\theta_2} & b_{1\theta_2} & c_{1\theta_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n\theta_1}x_{nM} & a_{n\theta_1}y_{nM} & a_{n\theta_1}z_{nM} & b_{n\theta_1}x_{nM} & b_{n\theta_1}y_{nM} & b_{n\theta_1}z_{nM} & a_{n\theta_1} & b_{n\theta_1} & c_{n\theta_1} \\ a_{n\theta_2}x_{nM} & a_{n\theta_2}y_{nM} & a_{n\theta_2}z_{nM} & b_{n\theta_2}x_{nM} & b_{n\theta_2}y_{nM} & b_{n\theta_2}z_{nM} & a_{n\theta_2} & b_{n\theta_2} & c_{n\theta_2} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_{1\theta_1}x_{1M} & c_{1\theta_1}y_{1M} & c_{1\theta_1}z_{1M} \\ c_{1\theta_2}x_{1M} & c_{1\theta_2}y_{1M} & c_{1\theta_2}z_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n\theta_1}x_{nM} & c_{n\theta_1}y_{nM} & c_{n\theta_1}z_{nM} \\ c_{n\theta_2}x_{nM} & c_{n\theta_2}y_{nM} & c_{n\theta_2}z_{nM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$X_1 = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ t_x \ t_y \ t_z]^T$$

$$X_2 = [r_{31} \ r_{32} \ r_{33}]^T \quad (11)$$

然而, 由于wMPS固有的测角误差、空间控制点坐标的测量误差、发射站光平面的平面度误差等因素, 所

3 优化方法及初值预估

L-M 算法的初值为迭代的起点, 它的选取对于计算过程的复杂度和计算结果的精确性都有着重要影响. 好的迭代初值不仅可以避免迭代过程收敛于局部极值点, 保证计算结果的准确性, 而且可以减少迭代次数, 提高计算效率.

设定向参数中旋转角度值 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 对应旋转矩阵 R 内各元素为 $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$. 那么, 对定向参数的初值预估可以等效为对 $r_{11} \sim r_{33}$ 及 t_x, t_y, t_z 初值的预估.

将各控制点对应各光平面约束展开, 可把约束方程组整理为 $AX=D$. 其中:

以保证其在一个较小范围内. 故 D 可以被简化为元素为0的列向量. 对式(7)进行分解, 整理为 $A_1X_1 + A_2 \cdot X_2 = 0$. 其中:

求初值完全满足控制点提供的扫描光平面方程约束 $A_1X_1 + A_2X_2 = 0$ 是难以实现的, 所以退而求其次, 尽量使得所取的wMPS发射站定向参数初值满足控制点光平面方程约束. 这一想法体现在数学上即使得 $A_1X_1 + A_2X_2$ 尽量接近于零向量, 可以通过让它的模尽量接近0使其成立. 又因为向量的模恒大于零, 所以只需要求解模的极小值即可, 即求 $\min \|A_1X_1 + A_2X_2\|^2$. 由于旋转矩阵 R 为正交矩阵, 故存在约束 $\|X_2\|^2 = 1$. 即可建立带有约束的目标函数为

$$\|A_1X_1 + A_2X_2\|^2 + \lambda(\|X_2\|^2 - 1) = \min \quad (12)$$

对式(12)的左边分别对 X_1 和 X_2 进行求导并使导数为 0, 可得

$$\begin{cases} A_2^T A_2 X_2 + A_2^T A_1 X_1 + \lambda X_2 = 0 \\ A_1^T A_1 X_1 + A_1^T A_2 X_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

求解式(13)可得

$$\begin{cases} A_2^T (I - A_1 (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T) A_2 X_2 = \lambda X_2 \\ X_1 = -(A_1^T A_1)^{-1} A_1^T A_2 X_2 \end{cases} \quad (14)$$

把结果代入目标函数 $\|A_1 X_1 + A_2 X_2\|^2$, 可化简得

$$\|A_1 X_1 + A_2 X_2\| = \lambda \quad (15)$$

可以观察到 X_2 为 $(A_2^T (I - A_1 (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T) A_2)$ 的单位特征向量, 为使 λ 最小, X_2 应为 $(A_2^T (I - A_1 (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T) A_2)$ 的最小特征根所对应特征向量. 可以证明 $(A_2^T (I - A_1 (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T) A_2)$ 为正定矩阵, 故矩阵 $(A_2^T (I - A_1 (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T) A_2)$ 的最小特征值对应的特征向量即为 X_1 的初值. 然后, 根据式(15), 得到 X_1 即可得到全部迭代初值.

需要注意的是, 由于上述光平面约束中的光平面几何模型是一整个平面, 而实际 wMPS 扫描光平面是一个半平面, 故上述解法可以解出不同的两个满足条件的初值. 可以通过“光平面扫描至接收器时, 发射站原点指向接收器的向量与该光平面的法向量呈 90° 且符合右手定则”这一性质来进行错误初值的剔除.

4 验证实验

验证实验包括以下几个步骤:

(1) 搭建实验平台, 合理布置 wMPS 发射站、控制场和比对点位置, 并测量控制点和比对点坐标;

(2) 令发射站扫描控制点, 使用后方交会快速定向法完成定向解算, 将定向结果代入 wMPS 坐标测量模型, 测量比对点坐标, 与步骤 1 测量的结果进行比对, 观察误差大小, 验证方法的正确性;

(3) 挪动发射站位置(模拟发射站收到干扰的过程), 再次进行后方交会快速定向, 与步骤 2 中同样的方法进行比对点坐标测量和比对误差, 验证方法的快速性.

如图 4 所示, 建立验证实验平台, 该平台由天津大学自主研制的 wMPS(包含发射站 A 和发射站 B)、控制场、比对点、激光跟踪仪组成.

激光跟踪仪为徕卡 AT901, 三维坐标测量误差为 $\pm(15 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m})$, 远低于 wMPS 的测量误差^[6], 可以作为测量精确度基准. 根据上述定向模型, 校准所得定向参数描述了控制场坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 到发射站坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 的转换关系, 又因为控制场坐标由

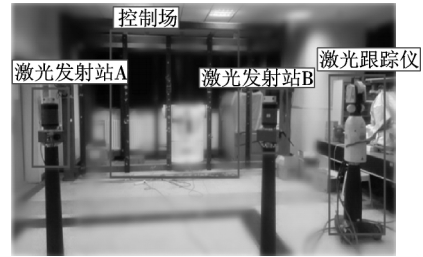


图 4 实验平台整体布局

Fig. 4 Layout of experimental platform

激光跟踪仪测量, 即 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 和激光跟踪仪坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 相同, 所以校准后的发射站定向参数实际上描述了 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 和 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 的定向关系. 因此, 发射站的测量坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 与 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 等同. 所以, 实验中, 可以把激光跟踪仪测量结果作为比对基准, 用 wMPS 测量结果与基准进行比较, 得出 X, Y, Z 方向的偏差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 及点位误差 ΔM ($\Delta M = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$), 以此来评价 wMPS 发射站校准精确度.

控制场区域距离发射站约 5 m, 控制点和比对点分布在 $3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的控制场内. 控制点和比对点分布如图 5 所示.

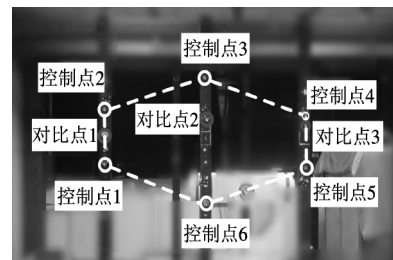


图 5 控制点及比对点分布

Fig. 5 Layout of control and verification points

激光跟踪仪测得控制点及比对点的坐标见表 1.

表 1 激光跟踪仪测量结果

Tab. 1 Measurement result of laser tracker mm

| 点名 | | X | Y | Z |
|-----|---|-----------|----------|---------|
| 控制点 | 1 | -2 730.14 | 3 533.41 | 107.14 |
| | 2 | -2 722.72 | 3 528.69 | 536.06 |
| | 3 | -1 842.81 | 3 412.26 | 781.91 |
| | 4 | -939.92 | 3 300.55 | 469.26 |
| | 5 | -940.24 | 3 304.06 | 58.09 |
| | 6 | -1 838.48 | 3 422.82 | -220.39 |
| 比对点 | 1 | -2 722.39 | 3 531.18 | 331.56 |
| | 2 | -1 825.72 | 3 412.78 | 453.03 |
| | 3 | -940.09 | 3 301.66 | 391.66 |

把表1中控制点1至控制点6坐标值代入定向参数优化方程(6),结合发射站扫描时间及光平面结构参数,经过初值估计和优化计算,得出发射站定向参数如表2所示。

表2 发射站定向参数校准结果

Tab.2 Calibration result of transmitters

| 激光发射站 | α/rad | β/rad | γ/rad | t_x/mm | t_y/mm | t_z/mm |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A | 0.014 94 | -0.001 24 | 0.288 01 | 3 209.19 | 1 346.67 | -112.39 |
| B | -0.007 58 | -0.008 66 | -2.839 49 | -1 292.32 | -1 319.37 | -101.83 |

以表2中计算结果作为定向参数代入wMPS坐标测量模型,分别测量比对点1、2和3的坐标,并把结果和激光跟踪仪测量坐标进行比对,结果如表3所示。

表3 比对点测量结果

Tab.3 Measurement result of verification points mm

| 比对点 | x | y | z | Δx | Δy | Δz | ΔM |
|-----|-----------|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -2 722.42 | 3 531.12 | 331.70 | 0.02 | 0.06 | 0.13 | 0.15 |
| 2 | -1 825.65 | 3 412.53 | 452.90 | 0.07 | 0.25 | 0.13 | 0.29 |
| 3 | -940.04 | 3 301.88 | 391.56 | 0.05 | 0.22 | 0.10 | 0.25 |

由上述比对结果可知,当控制场存在6个控制点时,利用本文方法的校准结果进行的坐标测量的点位误差优于0.3 mm。

为了验证校准方法的快速性,保持控制场不变,分别挪动发射站A和B到任意新位置,以模拟工业现场扰动对发射站的影响。使用新位置处的发射站A和B扫描各控制场接收器,即可再次通过优化计算完成定向参数的校准。这一过程完全不需要人工或外部设备参与,实现了发射站定向的自动化。二次校准后优化计算结果如表4所示。

表4 发射站定向参数二次校准结果

Tab.4 Calibration result of transmitters in second time

| 激光发射站 | α/rad | β/rad | γ/rad | t_x/mm | t_y/mm | t_z/mm |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A | 0.021 691 | -0.039 014 | 0.388 011 | 3 559.434 | 2 161.461 | 433.178 |
| B | -0.014 151 | 0.010 724 | -2.739 424 | -653.047 | -1 940.585 | 372.074 |

把表4中的二次校准结果代入wMPS坐标测量模型,再次对1、2、3号比对点进行测量,结果见表5。

由表5比对结果可知,在发射站受到模拟扰动影响时,只需通过重新扫描控制点,即可完成重新定向,并保持精度水平,这也证明了后方交会快速定向方法

的自动化程度高,能够有效提高wMPS定向效率。

表5 比对点二次测量及比对结果

Tab.5 Measurement result of verification points in the second time mm

| 比对点 | x | y | z | Δx | Δy | Δz | ΔM |
|-----|-----------|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -2 722.49 | 3 531.31 | 331.57 | 0.10 | 0.13 | 0.01 | 0.16 |
| 2 | -1 825.69 | 3 412.66 | 453.23 | 0.03 | 0.12 | 0.20 | 0.24 |
| 3 | -940.07 | 3 301.78 | 391.47 | 0.02 | 0.12 | 0.19 | 0.22 |

5 结 语

本文在对wMPS发射站数学模型进行研究的基础上,借鉴工程测量领域的后方交会原理,结合控制点坐标约束,建立了定向参数优化约束方程。利用旋转矩阵的正交性,采用拉格朗日乘子法对优化的初值进行了计算,选用L-M优化算法对最终结果进行求解。实验中,建立了包含两台发射站的wMPS验证平台,在发射站挪动前后对其进行了定向参数的校准,并分别把校准结果代入坐标测量模型,对比对点进行了测量及结果的比对。结果表明,使用本文方法完成定向的wMPS的坐标测量精确度优于0.3 mm,满足实际应用需求。此外,本方法实现了定向参数的自动校准,可以在发射站进行移动后准确、快速地校准出其新位置处的定向参数。最后,在一些环境复杂、开阔性差的应用环境中,可以通过灵活布置控制场来使用本校准方法实现定向参数的自动校准,从而提高了该校准方法的适应性。

参考文献:

- [1] Maisano D, Jamshidi J, Franceschini F, et al. Indoor GPS: System functionality and initial performance evaluation [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3 (3): 335-343.
- [2] Schmitt R, Nisch S, Schonberg A, et al. Performance evaluation of iGPS for industrial applications [C]// *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IP-IN)*. Zurich, Switzerland: IEEE, 2010: 1-8.
- [3] Yang L H, Yang X Y, Zhu J G, et al. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 758-764.
- [4] 薛彬. wMPS分布式空间测量定位系统性能分析与优化[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2014.

Xue Bin. The Performance Analysis and Optimization of the Distributed Workspace Measuring and Positioning System

- [D]. Tianjin: School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, 2014(in Chinese).
- [5] 端木琼. wMPS 系统的硬件平台优化及动态坐标测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2012.
- Duanmu Qiong. Research of Hardware Platform Optimization and Dynamic Measurement of wMPS [D]. Tianjin: School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, 2012(in Chinese).
- [6] Yang L H, Zhu J G, Wu B, et al. Workspace measurement positioning system based on optical scanning and wireless sensor network [C]//*International Conference on Materials, Mechatronics and Automation (ICMMA)*. Melbourne, Australia, 2011: 1953-1958.
- [7] Shi G, Zhang F M, Qu X H. Economical type large-scale laser automatic coordinate measuring system [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(8): 1957-1965.
- [8] 薛 彬, 郝继贵, 杨凌辉, 等. wMPS 系统在飞机水平测量中的应用[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 22-26.
- Xue Bin, Zhu Jigui, Yang Linghui et al. The application of the wMPS in airplane level measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(8): 22-26 (in Chinese).
- [9] 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, 45 (9): 814-819.
- Yang Linghui, Zhu Jigui, Zhang Guangjun, et al. Orientation method for workspace measurement positioning system based on scale bar [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(9): 814-819 (in Chinese).
- [10] 杨凌辉, 杨学友, 劳达宝, 等. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1105-1109.
- Yang Linghui, Yang Xueyou, Lao Dabao, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1105-1109 (in Chinese).
- [11] 任永杰, 郝继贵, 吴 军, 等. 采用互扫描法自动标定工作空间定位系统[J]. 光学精密工程 2015 23(3): 609-616.
- Ren Yongjie, Zhu Jigui, Wu Jun, et al. Self-calibration of workspace measurement and positioning system by using inter-scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 609-616(in Chinese).
- [12] 王 琼, 郝继贵, 薛 彬, 等. wMPS 系统中扫描光面的拟合与评定技术[J]. 光电工程, 2013, 40(6): 84-90.
- Wang Qiong, Zhu Jigui, Xue Bin, et al. Techniques of scanning optical surface fitting and evaluation in wMPS [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(6): 84-90(in Chinese).
- [13] 劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 基于旋转平面激光扫描测角的新型坐标测量系统[J]. 传感器与微系统 2010, 29(12): 99-101.
- Lao Dabao, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. Constructing measuring network with scanning planar laser space position system [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(12): 99-101 (in Chinese).
- [14] Zhao Z Y, Zhu J G, Lin J R, et al. Transmitter parameter calibration of the workspace measurement and positioning system by using precise three-dimensional coordinate control network [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): (08410) 81- (08410) 88.
- [15] 吴庆双. 基于空间后方交会的三维坐标测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学遥感信息工程学院, 2005.
- Wu Qingshuang. The Research of 3D Coordinates Acquisition Based on Spatial Resection [D]. Wuhan: School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 2005(in Chinese).
- [16] More J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory [C]//*Proceeding of the Biennial Conference on Numerical Analysis*. BerlinWest, Germany, 1978: 105-116.

(责任编辑: 何静菁)