

## 采用精确三维控制场的 wMPS 全局组网定向方法

赵子越<sup>1</sup>, 郝继贵<sup>2</sup>, 杨凌辉<sup>2</sup>

- (1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;
2. 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:** 工作空间测量定位系统是一种基于激光扫描的三维坐标大尺寸分布式测量系统, 目前已广泛应用于大尺寸测量领域。该系统可以通过增加发射站数目来扩展量程同时精度并不损失, 其前提是有了一套精确的全局定向参数。在系统多平面约束的数学模型基础上, 阐述了一种基于三维控制场的 wMPS 全局组网定向方法。在标定空间内设置点位坐标已知的控制点组成控制场, 给出了组网定向的模型及优化方法, 并给出迭代初值生成方法。实验表明: 通过基于控制场全局组网定向方法后, 系统与激光跟踪仪对比后点位误差优于 0.15 mm, 在提高效率的同时大大提高了系统的精度。

**关键词:** 全局组网定向; 激光扫描; 精确三维控制场; 大尺寸测量; 工作空间测量定位系统  
**中图分类号:** TN247   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117001

## Orientation parameters calibration of wMPS by using precise 3D coordinate control network

Zhao Ziyue<sup>1</sup>, Zhu Jigui<sup>2</sup>, Yang Linghui<sup>2</sup>

- (1. Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The wMPS was a 3D coordinate system based on laser scanning, which was widely applied in large-scale metrology. The orientation parameters calibration was the critical technique of the system as it could solve the problem between the large measurement scale and high accuracy. This paper focused on a novel orientation parameter calibration method by using high precise three-dimensional coordinate control network after the mathematic model of the system was stated. Several calibration points with known coordinates were set in the workspace to establish the precise 3D coordinate control network. After the novel model of orientation parameters calibration had been explained, both calculation method for optimization and the produce of the initial iteration value were given. As indicated by the results of the verifying experiment, the accuracy and efficiency of the orientation calibration could be distinctly improved by using the proposed method. The experimental data show that the 3D coordinate measurement error is less than 0.15 mm as a merit of the proposed method.

**Key words:** orientation parameters calibration; laser scanning; precise 3D coordinate control network; large-scale metrology; wMPS

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51305297)

作者简介: 赵子越(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电测量及系统校准方面的研究。Email: maple1111@tju.edu.cn

导师简介: 郝继贵(1970-), 男, 教授, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。Email: jiguizhu@tju.edu.cn

## 0 引言

工作空间测量定位系统(workspace Measurement and Positioning System, wMPS)是一种基于光电扫描的新型大尺寸多站位分布式三维坐标测量系统。该系统由分布于测量工作空间内的多个发射站构成全局测量网络,并由位于待测点处的多个接收器获得其三维坐标值完成测量<sup>[1-3]</sup>。更为具体得说,发射站发射两束绕着旋转轴匀速旋转并带有一定倾斜的激光扇面,同时每当发射站旋转到固定位置处发射站发射同步光脉冲信号作为同步标记,在被测空间内实现扫描;接收器则利用内部的光电二极管来感应光信号,通过信号处理器的信号放大电路及计时电路将光脉冲信号转化为位置信息,完成坐标的测量。由于具有精度高、效率高、扩展性好、实时并行测量等优点,该系统在大型飞机制造、数字化造船、机器人引导等工业制造测量领域中获得广泛关注,已成为国内外大尺寸测量领域的研究热点。对于该项技术,在国外,日本的尼康公司生产的 iGPS 测量系统形成产品,并应用到了飞机装配制造等领域;在国内,西安交通大学的刘志刚教授对该项技术进行深入研究,成功制造了原理样机;而天津大学的郝继贵教授团队对该项技术作了更深层次的研究,对机械结构设计、系统硬件设计融入了创新性想法,同时在软件方面研究了系统的标定优化算法、空间布局及优化算法等,进行了一系列系统研究与实验,形成了一套从硬件到软件全部自主研发制造的产品,并成功应用于国内飞机装配领域、大型船舶制造领域和航天全物理实验仿真领域<sup>[4-6]</sup>。

测量精度是测量设备的重要指标之一,系统全局组网定向方法作为该系统的关键核心技术直接制约系统测量精度<sup>[7-8]</sup>。以往的全局定向方法一般采用标准尺构建几何约束,能够在现场中实现应用,该方法需要较为准确的迭代初值,但是实际中迭代初值往往精度不高从而影响整个系统的精度<sup>[9-11]</sup>。文中针对这一问题展开深入研究,首先介绍了系统的基本原理与数学模型,在此基础上提出了一种基于三维控制场的全局组网方法,并在给出全局组网模型及迭代初值估计方法,在提高了组网效率的同时使标定精度溯源至控制场的精度,从而提高了系统的测

量精度。最后经过实验验证,系统与激光跟踪仪进行点位精度对比其精度优于 0.15 mm,并在工业现场中得到广泛应用。

## 1 wMPS 数学模型及测量原理

wMPS 是一种基于光电扫描的多站大尺寸测量系统,系统组成如图 1 所示。系统主要包括:发射站,接收器,前端处理器和中心计算机。发射站发射两束绕着转轴匀速旋转并带有一定倾斜的激光扇面,同时每当发射站旋转到固定位置处发射站发射同步光脉冲信号作为同步标记,在被测空间内实现扫描;接收器感应光信号,通过信号处理器的信号放大电路及计时电路将光脉冲信号转化为时间信息,接收器设计成半径为 1.5 in 球形接收器,方便与激光跟踪仪作数据对比;信号处理器和终端处理器之间通过无线传输模块进行通讯,终端处理器对接收到的时间信息进行处理后可进行坐标的解算、显示及存储,同时终端处理器还负责管理整个系统资源,包括现场定向以及资源使用权限的分配等。

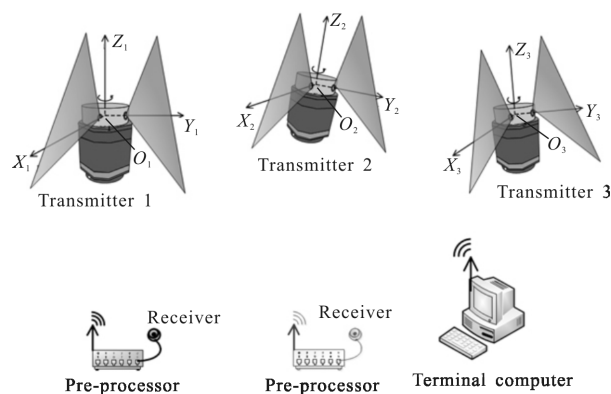


图 1 wMPS 结构示意图

Fig.1 Schematic configuration of wMPS

发射站抽象为绕着旋转轴旋转的两个非平行激光扇面,激光扇面和旋转轴都具有一定的倾角,其结构参数即两激光扇面在发射站坐标系下的方程作为一项重要参数在发射站安装完成后通过标定给出。将接收器  $P(x, y, z)^T$  抽象为一个质点,建立如下数学模型。如图 2 所示,  $OXYZ$  为发射站坐标系,定义旋转轴为  $Z$  轴,平面 1 和旋转轴的交点为原点,平面 1 上过原点且与旋转轴垂直的直线为  $X$  轴,根据右手定则确定  $Y$  轴。发射站逆时针旋转,转速为  $w(\text{rad/s})$ 。发

射站两激光扇面的平面方程为:

$$\begin{cases} a_1x+b_1y+c_1z+d_1=0 \\ a_2x+b_2y+c_2z+d_2=0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(a_1, b_1, c_1, d_1)^T, (a_2, b_2, c_2, d_2)^T$  为预先标定好的光平面 1 及光平面 2 的结构参数。

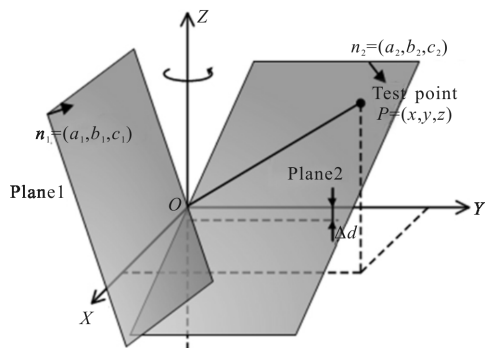


图 2 数学模型

Fig.2 Mathematical model

当两激光扇面分别扫过接收器时, 测量同步光信号及扫描平面光信号到达光电二极管的时刻  $t_0$  及  $t_1, t_2$  可得到光平面旋转角度为:

$$\begin{cases} \theta_1=w(t_1-t_0) \\ \theta_2=w(t_2-t_0) \end{cases} \quad (2)$$

此时, 发射站两个旋转激光光平面方程在自身坐标系下的方程参数为:

$$\begin{pmatrix} a_i(\theta_m) \\ b_i(\theta_m) \\ c_i(\theta_m) \\ d_i(\theta_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(\theta_m) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_m \\ b_m \\ c_m \\ d_m \end{pmatrix}; m \in (1, 2) \quad (3)$$

则  $R(\theta_m)$  为:

$$R(\theta_m) = \begin{bmatrix} \cos\theta_m & -\sin\theta_m & 0 \\ \sin\theta_m & \cos\theta_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据平面法向量垂直于平面上任意一条直线, 设被测点坐标为  $P$ , 全局坐标系到第  $i$  个发射站局部坐标系的转换矩阵为  $[R_i, T_i]$ , 其中  $R_i$  为旋转矩阵,  $T_i$  为平移矩阵, 则在每个发射站局部坐标系下, 每个发射站有如下等式成立:

$$\begin{bmatrix} a_{ij} & b_{ij} & c_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{ij} & -\sin\theta_{ij} & 0 \\ \sin\theta_{ij} & \cos\theta_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} + T_i + d_{ij} = 0; \quad (5)$$

$i=1, 2, 3 \dots, j=1, 2$

式中:  $i$  为发射站编号;  $j$  为激光扇面编号;  $[x_k \ y_k \ z_k]^T$  表示在全局坐标系下的待求点坐标;  $R_i$  和  $T_i$  表示全局坐标系到发射站  $i$  的转换关系, 也是全局组网定向的结果;  $a_{ij} \ b_{ij} \ c_{ij} \ d_{ij}$  代表发射站  $i$  的  $j$  平面的参数。式中共有 3 个未知数, 每个发射站可以列出 2 个方程, 因此最少需要 2 个站可以解算被测点的坐标。

由方程(5)可以看出, 坐标解算的过程中, 系统的定向参数  $[R_i \ T_i]$  是一项基本参数, 其准确程度直接影响到系统的测量精度。文中提出一种基于全局控制场的组网定向方法来计算这一参数。基于全局控制场的组网定向方法以高精度的坐标已知的全局控制场作为约束构建约束方程, 对定向参数求解, 完成全局定向过程。该过程首先需要建立高精度三维控制场, 然后根据发射站数学模型列出最优化方程, 采用迭代法进行求解。文中给出标定方法具体步骤, 并详细阐述了迭代初值的生成方法。

## 2 基于高精度控制场的全局组网方法

### 2.1 高精度全局控制场的建立及其坐标值优化

高精度三维控制场由空间中多个三维坐标精确已知的控制点组成。控制点的三维坐标通常采用激光跟踪仪在多个站位测量, 并对测量结果进行平差解算来获得。为减少外部环境对控制场精度影响, 控制点必须安放在室内牢固的承重梁或天花板上。wMPS 接收器与激光跟踪仪靶球尺寸一致, 且传感器中心皆为物理球心, 保证了两个测量系统测量点的空间位置一致性。

文中采用一种距离约束与角度约束融合的平差算法对三维控制场进行优化。分以下几个步骤进行:

(1) 设置全局控制点, 激光跟踪仪通过移动多站位对所有控制点进行测量完成整体测量任务。

(2) 通过坐标配准算法, 得到每个激光跟踪仪站位的转换关系。

(3) 利用激光跟踪仪高精度测距对全局控制点的三维坐标值进行优化。优化后控制场中每个点的精度可达到 0.01 mm。

### 2.2 基于高精度控制场的全局组网方法

基于高精度控制场的组网定向方法示意图如图 3 所示。假定控制场中有  $M$  个控制点, 经过优化后每个控制点的坐标表示为  $[x_m, y_m, z_m]^T$ , 以控制场坐标

系作为全局坐标系。假定系统中包含  $I$  个发射站, 每个发射站坐标系作为局部坐标系。当发射站的两个激光扇面分别扫过控制点时, 该点到激光扇面的距离可以由以下公式表示:

$$d_{mj} = \|(a_{T_{xj}}(\theta_{ij}) \quad b_{T_{xj}}(\theta_{ij}) \quad c_{T_{xj}}(\theta_{ij}) \quad d_{T_{xj}}(\theta_{ij})) \cdot \begin{pmatrix} R_{T_{xi}} & T_{T_{xi}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix}\|_2 \quad (m, i \in N^+, j \in (1, 2)) \quad (6)$$

式中:  $m$  表示控制点标号;  $i$  表示发射站标号;  $j$  表示每个发射站的激光扇面标号;  $T_{xi}$  表示在发射站  $i$  的局部坐标系下;  $\theta_{ij}$  表示  $i$  发射站  $j$  激光扇面的扫描角;  $[R_{T_{xi}} \quad T_{T_{xi}}]$  表示从控制场全局坐标系到发射站  $i$  局部坐标系下的旋转平移关系。

$$\begin{cases} f_{i1} = r_{i1}^2 + r_{i2}^2 + r_{i3}^2 - 1 = 0 \\ f_{i2} = r_{i4}^2 + r_{i5}^2 + r_{i6}^2 - 1 = 0 \\ f_{i3} = r_{i7}^2 + r_{i8}^2 + r_{i9}^2 - 1 = 0 \quad ; (i \in N^+) \\ f_{i4} = r_{i1}r_{i4} + r_{i2}r_{i5} + r_{i3}r_{i6} = 0 \\ f_{i5} = r_{i1}r_{i7} + r_{i2}r_{i8} + r_{i3}r_{i9} = 0 \\ f_{i6} = r_{i4}r_{i7} + r_{i5}r_{i8} + r_{i6}r_{i9} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}, r_{i6}, r_{i7}, r_{i8}, r_{i9}, r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}$  表示旋转矩阵。

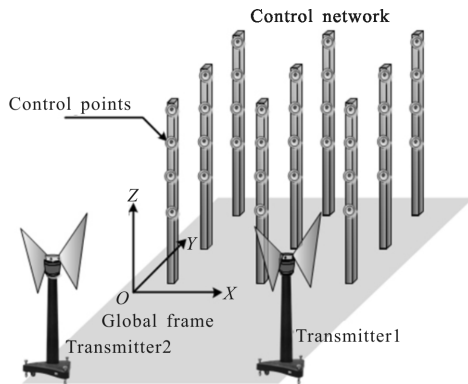


图 3 高精度三维控制场组网示意图

Fig.3 Schematic configuration of the orientation parameters calibration method by using precise 3D coordinate control network

显然, 对于每个发射站需要引入 6 个未知参数, 因此系统中共有  $6I$  个未知参数。假定每个控制点均可接收到系统中所有发射站的信息, 可构建  $2IM$  个约束方程。当满足  $2IM > 6I$  时, 可以采用罚函数法构

造以下最优化目标函数求解:

$$F = \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I ((d_{mj})^2) + \lambda \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^6 f_{in}^2 \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为惩罚因子。这种非线性最优化问题可以采用 Levenberg-Marquardt 算法进行求解, 得到每个发射站的  $[R_{T_{xi}} \quad T_{T_{xi}}]$ , 从而完成系统的组网定向。

### 2.3 迭代初值估计及目标函数求解方法

Levenberg-Marquardt 算法是一种广泛使用的非线性最小二乘算法, 兼具梯度法和牛顿法的优点, 即收敛速度快、算法稳定性好。但是, 采用 Levenberg-Marquardt 算法必须采用合适的迭代初值, 否则易造成迭代不收敛。因此迭代初值的选择极为重要, 考虑到每个发射站的初值获取方式一致, 文中以单发射站为例阐述迭代初值估计过程。

根据控制场组网模型, 约束方程可以写成以下的矩阵形式:

$$AX = D \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}x_{gm} & a_{11}y_{gm} & a_{11}z_{gm} & \cdots & a_{11} & b_{11} & c_{11} \\ a_{21}x_{gm} & a_{21}y_{gm} & a_{21}z_{gm} & \cdots & a_{21} & b_{21} & c_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1m}x_{gm} & a_{1m}y_{gm} & a_{1m}z_{gm} & \cdots & a_{1m} & b_{1m} & c_{1m} \\ a_{2m}x_{gm} & a_{2m}y_{gm} & a_{2m}z_{gm} & \cdots & a_{2m} & b_{2m} & c_{2m} \end{bmatrix}$$

其中, 矩阵  $A =$  是一个  $2m \times 12$  的系数矩阵。  $X = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5 \ r_6 \ r_7 \ r_8 \ r_9 \ r_x \ r_y \ r_z]^T$  作为未知的初值待求, 矩阵  $D = [-d_1 \ -d_2 \ \cdots \ -d_1 \ -d_2]^T$ 。由于发射站的激光扇面 1 经过  $x$  轴,  $d_1 = 0$ 。在安装过程中, 通过调整两个激光扇面大致都过原点,  $d_2$  是个很小的值, 因此  $d_2 \approx 0$ 。因此, 方程可以简化为:

$$AX = 0 \quad (10)$$

将未知量  $X$  分解为  $X_0 = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5 \ r_6 \ r_x \ r_y \ r_z]^T$  和  $X_3 = [r_7 \ r_8 \ r_9]^T$ , 则方程可写为:

$$BX_0 + CX_3 = 0 \quad (11)$$

根据正交矩阵的特性  $\|X_3\|^2 = 1$ , 最优化方程可写为:

$$C_R = \|BX_0 + CX_3\|^2 + \lambda (\|X_3\|^2 - 1) \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为任意实数。

将方程展开可以得到:

$$C_R = X_0^T B^T B X_0 + X_3^T C^T C X_3 + X_0^T B^T C X_3 + X_3^T C^T B X_0 + \lambda (X_3^T X_3 - 1) \quad (13)$$

分别求出  $C_R$  求  $X_0$  和  $X_3$  的偏导函数, 偏导函数

值为 0, 方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_R}{\partial X_3} = 2C^T C X_3 + 2C^T B X_0 + 2\lambda X_3 = 0 \\ \frac{\partial C_R}{\partial X_0} = 2B^T B X_0 + 2B^T C X_3 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

将方程组化简为:

$$\begin{cases} D X_3 = \lambda X_3 \\ X_0 = -(B^T B)^{-1} B^T C X_3 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $D = C^T C - C^T B (B^T B)^{-1} B^T C$  是个  $3 \times 3$  的矩阵;  $X_3$  是矩阵  $D$  的特征向量, 从而可以解出  $X_3$ , 将  $X_3$  代入第二方程即可解出  $X_0$ , 从而得到迭代初值。将迭代初值代入最终优化目标方程, 即可得出定向参数。

由于矩阵的单位特征向量具有对称性, 通过这种方式计算的迭代初值会得到两组互为相反数的结果, 同时这也是因为采用整个平面方程来代表发射站激光器发出的半平面造成的。采用两组结果可以得到两组在发射站坐标系下的坐标值  $P: (x_{Txi}, y_{Txi}, z_{Txi})$ , 两组坐标值相对于原点中心对称, 其中一个为伪值, 必须剔除。如图 4 所示,  $n_{li}$  代表激光扇面的方向向量, 当激光平面扫过控制点  $P_{Txi}: (x_{Txi}, y_{Txi}, z_{Txi})$  时, 向量  $m_{Txi} \times n_{li}$  与 Z 轴夹角是锐角, 而向量  $m_{Txi}' \times n_{li}$  与 Z 轴夹角是钝角。因此, 伪值可以用以下的约束去剔除:

$$m_{Txi} \times n_{li} \cdot [0 \ 0 \ 1]^T \quad (16)$$

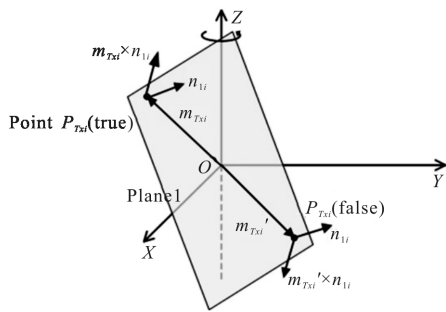


图 4 迭代初值的真值判定

Fig.4 Judgement of the initial value of iteration

### 3 精度对比实验

为了验证方法的可行性及相应的组网定向标定方法, 布置相距 6 m 的两台发射站组成坐标测量系统, 并在两发射站前方布置若干控制点组成控制场, 采用 2.1 节中的优化方法对控制场优化, 并采用 2.2 节中的定向方法对两发射站进行组网定向。定向完成后, 在工作空间内采集若干点位与激光跟踪仪进行

点位坐标精度对比。实验环境如图 5 所示。实验所用激光跟踪仪型号为 LEICA-AT901LR, 定位精度  $15 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m/m}$ 。对比过程中, 首先, 将两个系统坐标系进行配准, 然后以激光跟踪仪测量值为真实值, wMPS 测量值为实测值, 在同一坐标系下进行精度对比, 其结果如表 1 所示。

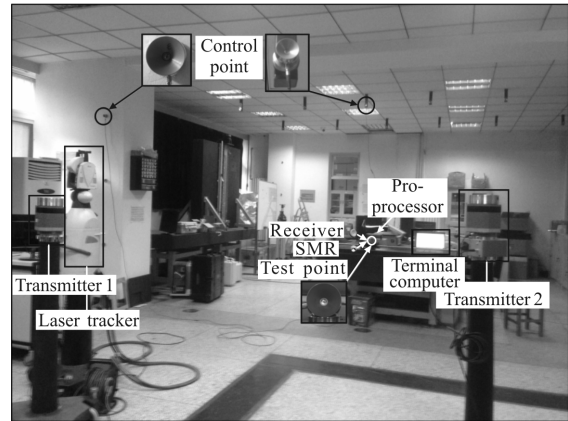


图 5 精度对比实验装置示意图

Fig.5 Experimental environment of accuracy comparison

表 1 采用三维控制点方法的 wMPS 系统与跟踪仪的精度对比

Tab.1 Accuracy comparison result with laser tracker by using the control network method

	Name	X/mm	Y/mm	Z/mm	dX/mm	dY/mm	dZ/mm	dMag/mm
1	wMPS	3 924.8	547.77	253.86	0.1	-0.09	0	0.13
	Tracker	3 924.7	547.86	253.85				
2	wMPS	3 915.19	2 686.89	255.19	-0.06	-0.03	-0.08	0.1
	Tracker	3 915.25	2 686.92	255.27				
3	wMPS	2 027.41	491.54	253.14	0.06	0	-0.06	0.09
	Tracker	2 027.35	491.54	253.2				
4	wMPS	2 029.46	2 517.67	253.09	0.09	-0.07	-0.02	0.12
	Tracker	2 029.37	2 517.74	253.1				
5	wMPS	4 280.29	670.9	-953.66	-0.09	0	0.06	0.11
	Tracker	4 280.38	670.9	-953.71				
6	wMPS	4 256.29	2 575.42	-954.72	-0.07	0.08	0.07	0.13
	Tracker	4 256.36	2 575.33	-954.79				
7	wMPS	1 737.52	422.51	-955.73	0.03	0.11	0.02	0.11
	Tracker	1 737.5	422.4	-955.76				
8	wMPS	1 700.38	2 731.76	-952.72	-0.06	0.06	0.08	0.11
	Tracker	1 700.44	2 731.7	-952.79				
	Standard deviation				0.05	0.05	0.04	0.08
	Average							0.11

由数据对比结果可以得出以下结论: 实验室条件下, 在  $2\text{m}\times 2\text{m}\times 1\text{m}$  的范围内, wMPS 与激光跟踪仪点对点精度优于  $0.15\text{mm}$ , 平均偏差为  $0.11\text{mm}$ 。值得说明的是, 以上误差中包含了两种仪器的转站误差, 转站误差主要包括转站算法误差和仪器测量误差, 转站算法误差对该项实验影响较小<sup>[12-13]</sup>, 主要误差是仪器测量误差, 由于跟踪仪的测量误差远小于 wMPS 的误差, 因此转站误差主要来源于 wMPS 的测量误差, 经过多次转站测量的证明, 转站误差略小于表 1 中的误差, 因此可以采用表 1 中的数值作为 wMPS 的测量误差。采用高精度三维控制场的组网定向方法具有高效率和高精度的优势, 能够满足所需的精度要求。

## 4 结 论

文中首先介绍了空间测量定位系统的测量原理及数学模型, 表明全局组网定向在其工作中的重要性; 其次, 详细阐述了基于高精度控制场的全局组网定向方法的数学原理, 包括约束方程建立以及迭代初值的获取; 最后, 依托天津大学研发的 wMPS 实验平台采用 2 台发射站对该方法进行了验证, 为了进一步验证组网定向精度, 采用激光跟踪仪作为参考基准对坐标测量精度进行验证, 此方法的坐标测量精度可控制在  $0.15\text{mm}$  以内, 满足工业应用的精度要求, 并且大大提高了标定效率, 拓展了该系统在大尺寸工业测量领域的应用前景。值得注意的是, 文中所阐述的方法还有较大的提升空间, wMPS 作为分布式系统, 为精度不一致的每个发射站提供不同的权值是提高系统精度的有效手段。

## 参 考 文 献:

- [1] Yang Linghui, Zhu Jigui, Wei Zhenzhong, et al. Correction method for orientation parameters of workspace measurement positioning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1629-1634. (in Chinese)
- [2] Zhou Weihu. Research on the precision theory of large-scale coordinate measuring systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [3] Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2014-2019. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Ren Yongjie, Xue bin, Yang Linghui, et al. Study on the problem of weighting for the workspace measuring and positioning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 668-672. (in Chinese)
- [6] Lao Dabao, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. Study on calibration technology of network laser scan space positioning system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(6): 1-6. (in Chinese)
- [7] Xiong Z, Zhu J G, Xue B, et al. Typical deployments of workspace measurement and positioning system[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2354-2363. (in Chinese)
- [8] Peggs G N, Maropoulos P G, Hughes E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223: 571-595.
- [9] Ren Yongjie, Zhu Jigui, Wu Jun, et al. Self-calibration of workspace measurement and positioning system by using inter-scanning [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 3(3): 609-616. (in Chinese)
- [10] Zhao Z, Zhu J, Xue B, et al. Optimization for calibration of large-scale optical measurement positioning system by using spherical constraint [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2014, 31(7): 1427-1435.
- [11] 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): 8.
- [12] Sun Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
- [13] Xie Zexiao, Han Zhenghua, Gao Xiang, et al. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen[J]. *Chinese Optics*, 2013, 5(5): 780-787. (in Chinese)