

文章编号 1004-924X(2015)03-0609-08

采用互扫描法自动标定工作空间定位系统

任永杰¹, 郝继贵¹, 吴军^{2*}, 薛彬³, 杨凌辉¹

(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. 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300; 3. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要:针对工作空间定位系统(wMPS)现有标定技术效率低, 标定程序复杂且须依赖外部测量设备等问题, 本文在研究 wMPS 测量原理的基础上提出了一种采用互扫描技术的自动标定方法。该方法结合该系统的扫描激光平面测量原理及使用特点, 通过在基站上安装已知坐标的接收传感器, 采用互扫描技术完成自动标定。文中以两台基站为基础, 详细阐述了该方法的数学原理, 并给出了基于几何约束的平差模型及其迭代解法。依托天津大学研发的 wMPS 实验平台对本方法进行了验证, 并与基准尺标定法进行了比对。实验结果显示, 采用本方法可以实现系统的自动标定, 在距离基站 5 m 内的测量空间内可获得 0.6 mm 的坐标测量精度。该方法在保证系统测量精度的同时大大提高了系统的测量效率。

关键词:大尺寸空间测量; 多平面交汇测量; 自动标定; 迭代优化; 互扫描

中图分类号: TN247; TH72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0609

Self-calibration of workspace measurement and positioning system by using inter-scanning

REN Yong-jie¹, ZHU Ji-gui¹, WU Jun^{2*}, XUE Bin³, YANG Ling-hui¹

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

2. College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300072, China;

3. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

Abstract: As workspace Measurement and Positioning System (wMPS) has lower calibration efficiency, complex algorithms and relying on auxiliary equipment, this paper presents a novel self-calibration method by using inter-scanning method. According to the multi-place intersection theory and system application characteristics, the automatic calibration was implemented by a inter-scanning technology on receivers mounted on the laser stations whose coordinates were known in advance. On the basis of two laser stations, the mathematical theory of the method was described, and the optimal algorithm (adjustment model) based on the geometrical constraint characteristics of the system was given in detail. The method was verified on a wMPS experimental platform developed by Tianjin

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-06-02.

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(No. 51225505); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041205); 国家自然科学基金资助项目(No. 51305297); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20130032120067)

University and was compared with the standard rule calibration method. The experimental results demonstrate that the inter-scanning method is an efficient solution for calibration of the stations, and the accuracy of the system achieves 0.6 mm in the space 5 m away from the station. Thus, the method proposed improves the calibration efficiency of the system while maintaining the measurement accuracy.

Key words: large-scale space measurement; multi-plane intersection measurement; self-calibration; iterative optimization; inter-scanning

1 引言

工作空间定位系统 (workspace Measurement and Positioning System, wMPS) 是一种面向大尺寸测量空间的多站网络式坐标测量与定位系统, 广泛应用于飞机、轮船等大部件的工业自动化装配与定位^[1-2]。该系统由分布于测量空间中的若干光电扫描基站与位于待测点处的光电接收传感器以及相应的控制网络组成, 具有测量精度高、量程可拓展及可多任务实时测量等优点^[3]。目前, 国外有尼康公司生产的 iGPS 测量系统, 其坐标测量精度在 20 m 内可达到 0.2 mm^[4]。国内天津大学郝继贵教授^[5]及西安交通大学的刘志刚教授^[6]均对该技术进行了深入研究并研制出了相关样机。

wMPS 测量系统的工作原理如下: 光电扫描发射基站发出两束对测量空间进行均匀扫描的扇形平面激光, 位于待测点处的光电接收器接收激光信息。通过发射基站的固有内部参数构建两个通过待测点的测量平面。为了获取待测点的空间坐标, 需要在该点接收到至少两台基站的激光信息, 得到 3 个以上的平面方程, 然后通过不同基站间的相互位置关系即可解算出待测坐标。其中, 多台发射基站相互位置关系的标定即为 wMPS 应用的关键技术^[7]。

一般的标定技术需要借助外部测量工具如激光跟踪仪或位移平台来获取测量控制点的坐标初值, 再进一步解算出相互位置参数, 这样不仅大大增加了系统的应用成本, 而且标定效率低下, 容易出现标定点信息匹配失误, 最终导致标定失败^[7-9]。为了简化标定过程、提高标定效率, 杨凌辉等人提出了一种基于标准尺的标定方法, 该方法无须外部设备的合作, 仅依靠标准尺自身的长度即可完成位置标定^[10]。但是该方法在标定过

程中标准尺前 6 个移动位置需保持竖直方向, 并且必须同时接收到所有站的信息, 整个标定过程需要 0.5~1 h, 效率低、实时性不好。

针对目前标定方法中存在的问题, 本文在研究 wMPS 测量原理的基础上提出了一种采用互扫描技术的自动标定方法。该方法首先在发射基站上安装事先标定好的测量接收器, 然后多个基站相互扫描其它基站上的测量接收器来实现发射基站的自动标定, 可以随放随用; 并且通过在测量空间内布置多个测量点来提高标定精度, 该方法大大简化了现有的标定过程, 提高了标定效率。

2 wMPS 系统测量原理

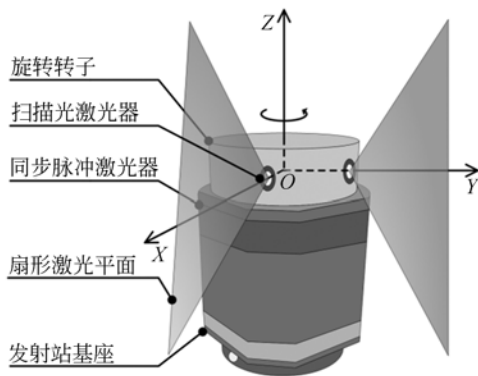
2.1 单台发射基站数学模型

单台 wMPS 基站及其测量模型如图 1 所示。基站顶部是一个可以高速旋转的转子, 转子上安装有两个线性激光发射器, 用以形成两束对测量空间高速扫描的扇形测量激光平面; 基站上还安装有一圈同步脉冲激光器, 该激光器可在转子转过某一特定位置时发出脉冲激光, 形成一个计时基准。接收器通过接收同步脉冲激光与扇形扫描激光可测出扫描激光扫过接收器时转子转过的角度^[5]。

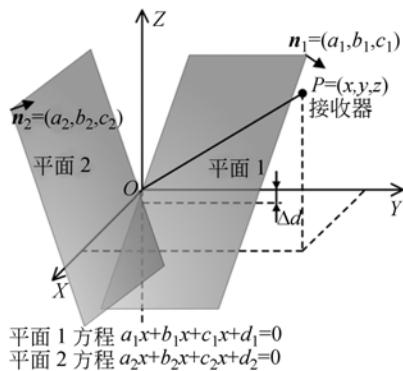
基站的测量数学模型描述如下^[10]: 首先定义转子的转轴为 z 轴, 扫描平面 1 与 z 轴的交点为原点 O , 原点指向转子转过的某一特定位置 (一般为电机码盘的零位刻线) 为 x 轴, 利用右手系原则定义 y 轴。在初始位置时, 平面 1 的法向量为 $\mathbf{n}_1(a_1, b_1, c_1)^T$, 根据模型定义可知其截距为 0; 平面 2 的法向量为 $\mathbf{n}_2(a_2, b_2, c_2)^T$, 其截距为 Δd ^[11]。那么定义初始位置处的平面方程为:

$$\begin{cases} a_1 x + b_1 y + c_1 z + d_1 = 0 \\ a_2 x + b_2 y + c_2 z + d_2 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $d_1 = 0, d_2 = c_2 \cdot \Delta d$ 。平面的法向量及平面



(a) 单台 wMPS 基站示意图
(a) Schematic of single wMPS station



(b) 数学模型
(b) Mathematical model

图 1 单台 wMPS 及其测量模型

Fig.1 Single wMPS station and its measurement model

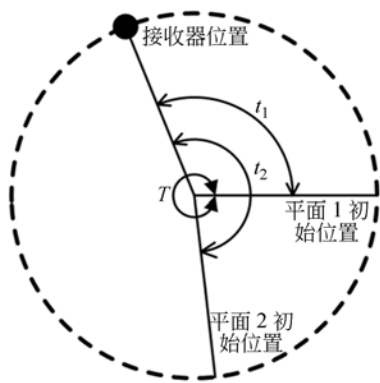


图 2 接收器扫描角测量示意图

Fig.2 Schematic of scanning angle measurement by wMPS receiver

的 z 轴截距在基站装配好后即可标定完成,并作为其内部参数固化在基站中。

如图 2 所示,接收器在收到同步脉冲激光信

号后开始计时,然后依次计量两个扫描光扫过接收器的时刻 t_1, t_2 ,则两个激光平面扫过接收器时转子转过的角度为:

$$\theta_i = \frac{t_i}{T} \times 2\pi \quad (i=1,2), \quad (2)$$

其中: T 为转子的旋转周期。则激光平面的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1,2). \quad (3)$$

旋转后两个激光平面的方程系数表示为:

$$\begin{bmatrix} a_i' \\ b_i' \\ c_i' \\ d_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} \quad (i=1,2). \quad (4)$$

这样就可以获得通过待测点的两个扫描平面的方程。

2.2 多基站交汇式空间坐标测量模型

wMPS 测量系统是一个网络交汇式坐标测量系统^[12],如上文所述,单台基站可以获取通过待测点的两个测量平面,如果测量空间布置 n 台发射基站($n \geq 2$),则可获得 $2n$ 个测量平面方程,如式(5)所示:

$$\begin{cases} a_{1j}x_j + b_{1j}y_j + c_{1j}z_j + d_{1j} = 0 \\ a_{2j}x_j + b_{2j}y_j + c_{2j}z_j + d_{2j} = 0 \end{cases} \quad (j=1,2,L,n), \quad (5)$$

其中: $[a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}]$ 表示第 j 台基站的第 i 个平面旋转后的平面参数,这些参数可通过式(2)、(3)、(4)求解; $[x_j, y_j, z_j]$ 表示被测点 $[x, y, z]$ 在基站坐标系 j 下的坐标,它们之间的关系可通过

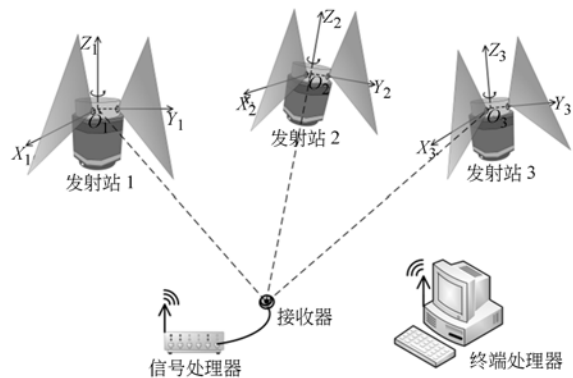


图 3 wMPS 系统交汇式测量示意图

Fig.3 Principle of intersection measurement by wMPS

基站间的相互关系给出,如式(6)所示:

$$\mathbf{R}_j[x_j, y_j, z_j] + \mathbf{T}_j = [x, y, z], \quad (6)$$

其中: $\mathbf{R}_j, \mathbf{T}_j$ 表示基站 j 到全局坐标系下的旋转平移关系,可提前标定。这样获得了 $2n$ 个平面交汇方程,用最小二乘法求解这个超定方程即可得到空间坐标。

图 3 为测量系统的测量模型,将基站 1 的坐标系定义为测量空间的全局坐标系。为了将其它发射基站的坐标系统一到全局测量坐标系下,需要在所有基站布局完成后预先标定各个基站相对于基站 1 的旋转矩阵与平移矩阵。下面以两个基站为例来介绍采用互扫描技术的测量系统自动标定技术。

3 采用互扫描技术的自动标定算法

3.1 互扫描靶在其基站下位置标定方法

如图 4 所示,定义基站 1 的坐标系 $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ 为测量空间的全局坐标系,基站 2 的坐标系为 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 。坐标系 2 相对于坐标系 1 的旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移矩阵 \mathbf{T} 分别为 $\mathbf{R} =$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \text{ 和 } \mathbf{T} = [t_1, t_2, t_3]^T. \text{ 在基站 1 下安}$$

装两个光电接收器 P_1 和 Q_1 形成互扫描靶 1,同理在基站 2 下安装两个接收器 P_2 和 Q_2 形成互扫描靶 2。互扫描靶 1,2 在各自坐标系下的坐标标定过程如下:

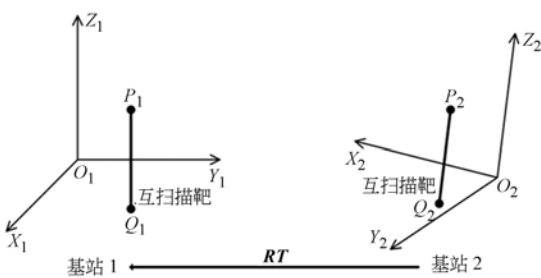


图 4 采用互扫描技术的标定算法数学模型示意图

Fig. 4 Mathematical model of self-calibration method by using inter-scanning

(1) 在测量空间内布置三台 wMPS 发射基站,如图 5 所示。其中基站 1 上安装有互扫描靶 1($P_1 Q_1$),基站 2 上安装有互扫描靶 2($P_2 Q_2$),由此通过现有的高精度标定方法(如基准尺法)标定出 3 台基站之间的相互位置关系,即它们之间坐标系转换的旋转、平移关系;

(2) 使用基站 2,3 作为测量基站来测量互扫描靶 $P_1 Q_1$ 在基站 3 坐标系下的坐标,然后通过坐标系 1,3 之间的转换关系得到 $P_1 Q_1$ 在基站 1 坐标系下的坐标。同理,使用基站 1,3 测量 $P_2 Q_2$ 在基站 3 坐标系下的坐标,通过坐标系 2,3 之间的转换关系即可得到 $P_2 Q_2$ 在基站 2 坐标系下的坐标。这样就实现了互扫描靶在其自身坐标系下的位置标定。

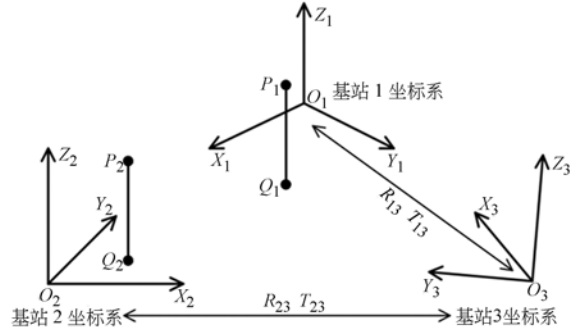


图 5 互扫描靶在其基站下位置标定示意图

Fig. 5 Diagram of position calibration of inter-scanning bar in its own station

3.2 基站标定优化方程的建立

根据旋转矩阵的定义得出约束方程^[11]:

$$\begin{cases} f_1 = r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 - 1 = 0 \\ f_2 = r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 - 1 = 0 \\ f_3 = r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2 - 1 = 0 \\ f_4 = r_{11} r_{21} + r_{12} r_{22} + r_{13} r_{23} = 0 \\ f_5 = r_{11} r_{31} + r_{12} r_{32} + r_{13} r_{33} = 0 \\ f_6 = r_{21} r_{31} + r_{22} r_{32} + r_{23} r_{33} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

P_2 和 Q_2 的坐标通过旋转矩阵与平移矩阵表示为基站 1 下的坐标 P_{21} 和 Q_{21} 。其中 $P_{21} = \mathbf{R} \cdot P_2 + \mathbf{T}, Q_{21} = \mathbf{R} \cdot Q_2 + \mathbf{T}$ 。由于 P_2 和 Q_2 可以接收到基站 1 的激光信号,那么由上文可知每个接收器可以建立两个平面约束方程, P_2, Q_2 可建立如下 4 个平面方程:

$$\begin{cases} F_{P_{2i}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{P_{2i}}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} P_{21} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (i=1,2) \\ F_{Q_{2i}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{Q_{2i}}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} Q_{21} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (i=1,2) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\theta_{P_{2i}}, \theta_{Q_{2i}}$ 表示基站 1 上的激光平面 i 扫过点 P_2, Q_2 时所转过的扫描角, $[a_i, b_i, c_i, d_i]^T$ 表示基站 1 第 i 个平面的初始参数, 平面旋转矩阵 $\mathbf{R}(\theta)$ 可由式(3)计算得到。该方程是以 \mathbf{R}, \mathbf{T} 为未知参量的方程。

同理, 通过基站 2 扫描基站 1 上的接收点 P_1 和 Q_1 也可获得 4 个平面约束方程:

$$\begin{cases} F_{P_{1i}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{P_{1i}}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} P_{12} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (i=1,2) \\ F_{Q_{1i}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{Q_{1i}}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} Q_{12} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (i=1,2) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $P_{12} = \mathbf{R}' \cdot (P_1 - \mathbf{T})$ 为 P_1 在基站 2 下的坐标, $\theta_{P_{1i}}, \theta_{Q_{1i}}$ 表示基站 2 上的激光平面 i 扫过点 P_1, Q_1 时所转过的扫描角。通过基站之间的相互扫描即可建立 8 个平面约束方程, 再加上旋转矩阵本身的 6 个约束方程, 共有 14 个方程构成非线性方程组, 以求解旋转矩阵与平移矩阵的 12 个未知数, 其优化目标为:

$$E = \sum_{i=1}^2 (F_{P_{2i}}^2 + F_{Q_{2i}}^2 + F_{P_{1i}}^2 + F_{Q_{1i}}^2) + \lambda \sum_{n=1}^6 f_n^2 \quad (10)$$

这个非线性优化问题可通过 Levenberg-Marquardt(L-M)算法求解。

3.3 迭代初值求解

L-M 算法是一种最小二乘拟合法, 通过迭代法逼近方程组的解^[10-11]。该方法对迭代初值要求较高, 初值须在真值点的附近, 否则可能出现收敛到其它极值点甚至无法收敛的现象。为了求解迭代初值, 要利用单台基站可以近似测量被测点的空间角度信息这一特性^[10]。

如图 1 所示, 在基站装配过程中, 通过装配工艺保证第二个平面在 z 轴的截距近似为 0, 这样两个平面交汇于空间被测点后即可形成一条通过原点指向被测点的射线, 该射线垂直于两个平面的法向量 (\mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2), 因此该射线的方向向量 \mathbf{r} 可表示为 $\mathbf{r} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$ 。在装配时尽量保证两个接收器与 z 轴平行; 在应用过程中, 尽量保证基站竖直放置, 这样就能近似认为 O, P, Q 3 点位于同一竖直平面内。

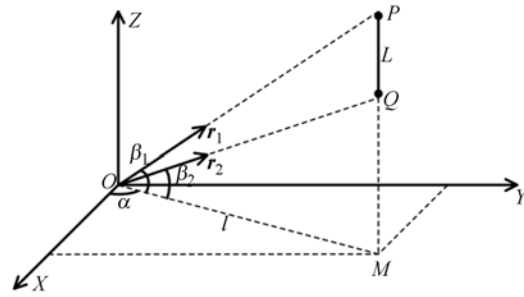


图 6 单基站坐标估算示意图
Fig. 6 Coordinate estimation method for single station

如图 6 所示, 定义 P, Q 的距离为 L , OP, OQ 相对于水平面的夹角分别为 β_1 和 β_2 。根据相应的几何关系可得:

$$\begin{cases} L = PM - QM = l \cdot \tan \beta_1 - l \cdot \tan \beta_2 \\ \mathbf{r}_1 = (x_{r1} \quad y_{r1} \quad z_{r1}), \mathbf{r}_2 = (x_{r2} \quad y_{r2} \quad z_{r2}) \\ \tan \beta_1 = \frac{z_{r1}}{\sqrt{x_{r1}^2 + y_{r1}^2}}, \tan \beta_2 = \frac{z_{r2}}{\sqrt{x_{r2}^2 + y_{r2}^2}} \end{cases} \quad (11)$$

解算出 P, Q 的坐标分别为 $(l \cos \alpha, l \sin \alpha, l \tan \beta_1)$ 和 $(l \cos \alpha, l \sin \alpha, l \tan \beta_2)$ 。其中 $\cos \alpha = \frac{x_{r1}}{\sqrt{x_{r1}^2 + y_{r1}^2}}, \sin \alpha = \frac{y_{r1}}{\sqrt{x_{r1}^2 + y_{r1}^2}}, l = \frac{L}{\tan \beta_1 - \tan \beta_2}$ 。

在这种近似状况下可求得 P_2, Q_2 在基站 1 下的坐标 P_{21}, Q_{21} 以及 P_1, Q_1 在基站 2 下的坐标 P_{12}, Q_{12} 。那么再结合这些接收器在其所在基站下的坐标以及旋转矩阵与平移矩阵可得到:

$$\begin{cases} \mathbf{R} \cdot P_2 + \mathbf{T} = P_{21} \\ \mathbf{R} \cdot Q_2 + \mathbf{T} = Q_{21} \\ \mathbf{R} \cdot P_{12} + \mathbf{T} = P_1 \\ \mathbf{R} \cdot Q_{12} + \mathbf{T} = Q_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中每个方程均可展开成关于 x, y, z 坐标的 3 个线性方程, 通过解这些关于 \mathbf{R}, \mathbf{T} 中 12 个未知数的 12 个线性方程组成的方程组即可求解出 3.1 节中方程组的近似解, 将这组近似解作为迭代初值即可解出精确的坐标系转化关系。

4 实验验证

本文提出的自动标定技术依托于天津大学精仪学院研发的 wMPS 测量空间定位系统进行原理验证。在测量空间内相距大约 5 m 布置两台 wMPS 发射基站, 用于互扫描的接收传感器的实验装置如图 7 所示。算法涉及的内部参数如表 1 所示。

表 1 基站扫描光平面参数

Tab. 1 Parameters of scanning plane of stations

基站平面		A	B	C	D
1	1	0.000 000 00	0.796 801 99	0.000 000 00	0.796 801 99
	2	-0.752 375 64	0.005 398 19	0.752 375 64	0.005 398 19
2	1	0.000 000 00	0.823 744 99	0.566 960 48	0.000 000 00
	2	0.734 811 82	0.000 129 63	0.734 811 82	0.000 129 63

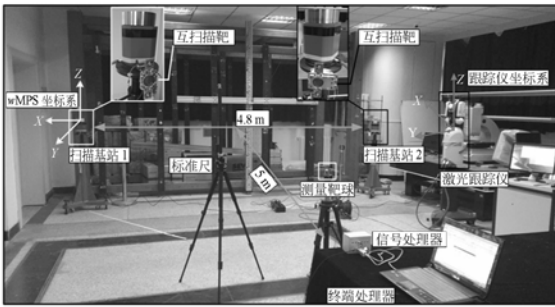


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental set-up

表 2 互扫描靶位置参数

Tab. 2 Positional parameters of inter-scanning targets

参数	基站 1		基站 2	
	P_1	Q_1	P_2	Q_2
x	-139.38	-139.67	69.08	70.64
y	-21.93	-23.48	118.76	113.70
z	-143.92	-263.69	-162.66	-282.18

通过接收器信号处理器接收各个接收器接收到的基站所用激光扫描时间,每个接收器采样 100 次后取平均值,再结合基站转速可求得各接收器相对扫描基站的扫描角,如表 3 所示。

表 3 双站互扫描结果

Tab. 3 Inter-scanning results of two stations (rad)

扫描角	基站 1		基站 2	
	P_2	Q_2	P_1	Q_1
平面 1	6.208 861	6.227 675	5.067 639	5.085 726
平面 2	1.459 898	1.436 647	0.302 529	0.278 908

由此通过本文提出的算法求得基站 2 相对于基站 1 的旋转矩阵与平移矩阵。

为了验证系统标定后的测量精度,采用基准长度法与激光跟踪仪测点法来分别进行比对实验,如图 7 所示。基准长度法是指测量系统分别

用两种方法标定的结果来测量空间内的基准长度,本文采用标准尺(1 250.15 mm)作比对基准,在测量空间内测量 8 个位置,结果如表 4 所示。跟踪仪测点法是指测量系统分别用两种方法的标定结果测量分布在空间内的 14 个测量点(在 3 个轴方向的分布空间约为: X 方向为 -900 ~ -4 000 mm, Y 方向为 2 000 ~ 5 000 mm, Z 方向为 -800 ~ 400 mm),同时也用激光跟踪仪测量这些公共点,由于两种系统的测量靶球直径是一样的,因此可直接将这些测量点作为公共点进行转站,即转站到激光跟踪仪坐标系下,与激光跟踪仪测得的结果进行比对,结果如图 8 所示。

表 4 基准长度测量比对

Tab. 4 Comparison of standard length measurement

	标准尺法结果	互扫描法结果	标准尺法偏差	互扫描法偏差
1	1 250.16	1 250.39	0.01	0.24
2	1 250.21	1 249.90	0.06	-0.30
3	1 250.16	1 250.38	0.01	0.21
4	1 250.02	1 249.83	-0.13	-0.19
5	1 250.04	1 250.22	-0.11	0.17
6	1 250.28	1 250.41	0.13	0.13
7	1 250.19	1 249.90	0.04	-0.29
8	1 250.08	1 250.00	-0.07	-0.08

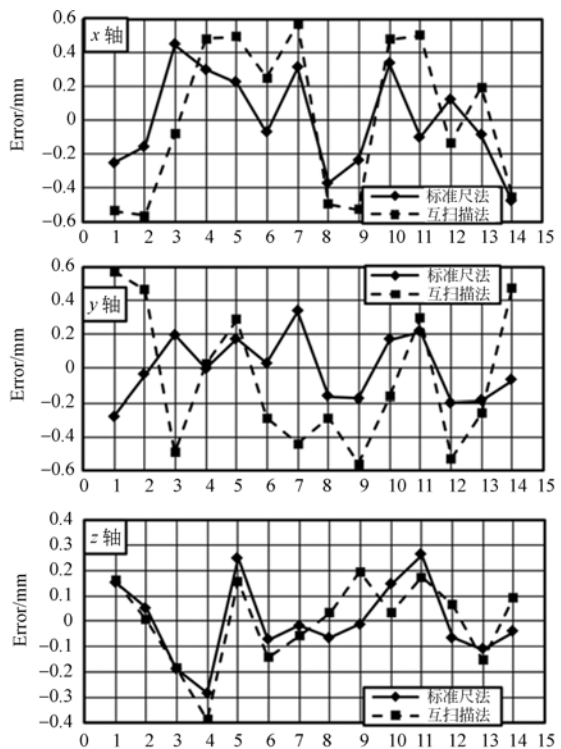


图 8 坐标测量精度比对结果

Fig. 8 Comparison of coordinate measurement

由表4和图8所示结果可知,采用互扫描技术的标定方法基准长度的测量最大偏差为0.30 mm,坐标测量3个方向的最大误差分别为0.57,0.56,0.38 mm;而基准尺标定法的基准长度最大偏差为0.13 mm,坐标测量则分别为0.47,0.33,0.28 mm。由此可见,本方法标定误差可以控制在0.6 mm以内,基本满足应用要求,并且标定过程可以自动完成;而采用标准尺法标定一次大约需要半个小时到一小时,因此本方法大大提高了标定效率。

5 结 论

本文介绍了空间测量定位系统(wMPS)的测量原理,建立了wMPS的数学模型以及系统标定

在其工作中的重要性。结合wMPS的测量原理分析了当前主要的系统标定方法及其优缺点,并在此基础上提出了一种基于互扫描技术的自动标定方法,以提高系统的标定效率。以两台基站为基础详细阐述了该方法的数学原理,包括非线性方程组的建立以及采用L-M迭代法所需初值的获取。最后依托天津大学研发的wMPS实验平台对本方法进行了验证,并与基准尺标定法进行了比对。为了进一步验证标定精度,采用激光跟踪仪作为参考基准对坐标测量精度进行了验证。实验结果表明,本方法的坐标测量精度可控制在0.6 mm以内,满足工业应用要求,并且大大提高了标定效率。该方法无需人工参与即可自动完成标定,在大尺寸工业测量领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 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; *Key Engineering Materials*, 2011: 1953-1958.
- [2] 时光,张福民,曲兴华. 经济型大尺寸激光自动坐标测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1957-1965.
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. (in Chinese)
- [3] CUYPERS W, VAN GESTEL N, VOET A, *et al.*. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3): 292-300.
- [4] SCHMITT R, NISCH S, SCHONBERG A, *et al.*. Performance evaluation of iGPS for industrial applications [C]. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich; IEEE, 2010: 1-8.
- [5] 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.
- [6] LIU Z G, XU Y Z, LIU Z Z, *et al.*. A large scale 3D positioning method based on a network of rotating laser automatic theodolites [C]. *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Harbin; IEEE, 2010: 513-518.
- [7] 劳达宝,杨学友,郝继贵,等. 网络式激光扫描空间定位系统标定技术研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(6): 1-6.
LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Study on calibration technology of network laser scan space positioning system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(6): 1-6. (in Chinese)
- [8] 劳达宝,杨学友,郝继贵,等. 扫描平面激光空间定位系统测量网络的构建[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(2): 261-265.
LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Constructing measuring network with scanning planar laser space position system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(2): 261-265. (in Chinese)
- [9] 劳达宝,杨学友,郝继贵,等. 扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 872-877.
LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 872-877. (in Chinese)
- [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, 45(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, 45 (9): 814-819. (in Chinese)

- [11] LIU Z X, ZHU J G, YANG L H, *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] 熊芝, 郝继贵, 薛彬, 等. 空间测量定位网络的典型布局 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2354-2363.

XIONG ZH, ZHU J G, XUE B, *et al.*. Typical deployments of workspace measurement and positioning system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2354-2363. (in Chinese)

作者简介:



任永杰(1975—),男,河北河间人,博士,讲师,1998年于华北电力大学分别获得学士学位,2004年,2007年于天津大学获得硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试,视觉检测技术,机器人控制及机器人测量技术方面的研究。E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

导师简介:



郝继贵(1970—),男,安徽无为,人,博士生导师,教授,1991年,1994年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,1997年于天津大学获得博士学位,主要从事视觉检测及大尺寸测量等技术的研究。E-mail: jigui@tju.edu.cn

通讯作者:



吴 军(1986—),男,山西繁峙人,博士研究生,2009年于天津大学获得学士学位,主要从事大尺寸光电检测技术的研究。E-mail: wujun8686@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)