

## 工作空间测量定位系统最佳测量点的确定方法

薛 彬<sup>1</sup>, 郝继贵<sup>2</sup>, 郑迎亚<sup>2</sup>

(1. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072;

2. 天津大学 精密测试计量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(workspace Measuring and Positioning System, wMPS)是一种基于旋转激光扫描平面交会的室内大尺寸定位系统。它可实现计量精度的三维坐标测量,主要应用于制造加工及装配领域的测量和检测任务。作为一种大尺寸的测量系统,与中小尺寸测量系统相比,它的测量空间与测量精度的矛盾更加突出。如何寻找此系统所覆盖测量空间内精度最高的一个点或者以此点为中心的一个区域是一个非常重要而且有意义的问题。从该测量系统的测量原理出发,与传统经纬仪相对比,给出一种利用解算方程系数矩阵的条件数作为评价空间交会优劣的评价模型,继而引入粒子群算法来求解测量空间内的最佳测量点,实验结果表明:评价模型和对应的求解方法是正确的,也是有效的,利用此方法得到的测量点为中心的区域坐标不确定度最小,而且此方法为今后的发射站布局问题的研究打下了有益的基础。

**关键词:** 工作空间测量定位系统; 最佳测量点; 条件数; 粒子群算法

**中图分类号:** TN247    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1218-05

## Determination method of optimal measurement point of workspace measuring and positioning system

Xue Bin<sup>1</sup>, Zhu Jigui<sup>2</sup>, Zheng Yingya<sup>2</sup>

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The workspace Measuring and Positioning System (wMPS) is an indoor large-scale positioning system based on the intersection of rotating laser planes. It can provide 3D coordinates with metrological accuracy, applicable in the measurement and test tasks of manufacturing and assembly. As a large-scale measurement system, the contradiction between its measurement range and measurement precision is more intense than the small-to-medium-scale measurement system. How to find the optimal measurement point or the optimal measurement area centered with this point is an important and significant problem. Moving away from the measurement principle of the measurement system, compared with the traditional theodolite, an evaluation model was presented, which used the condition number of the coefficient matrix of the measurement equation as the indicator of the quality of intersection, then the Particle Swarm Optimization algorithm was introduced to solve the optimal measurement point. The experimental results

收稿日期: 2014-08-12; 修订日期: 2014-09-20

基金项目: 国家支撑项目(2011BA13B00); 国家 863 计划(2012AA041205)

作者简介: 薛彬(1986-), 男, 博士生, 主要从事基于激光测量技术方面的研究工作。Email: xuebin.monson@gmail.com

导师简介: 郝继贵(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光测量及控制网络技术方面的研究工作。Email: jigui@tju.edu.cn

show that the proposed evaluation model and the problem-solving method are correct and effective; they produce the minimum uncertainty around the calculated optimal point, and lay the foundation for the future research on the transmitter-layout problem.

**Key words:** wMPS; optimal measurement point; condition number; Particle Swarm Optimization algorithm

## 0 引言

工作空间测量定位系统是一种类似于经纬仪的分布式大尺寸测量定位系统,能在生产车间内实现多目标、实时高精度的定位测量<sup>[1]</sup>。它主要由激光发射站构成的测量网络、代表被测点的接收器和中心计算机组成。其中,每台发射站利用两个旋转激光扫描平面和在每旋转周的码盘起点位置定时发出的同步光信号来测量待测接收器相对于该发射站的水平角度和垂直角度;而接收器则利用内部的光电二极管来感知发射站发出的携有角度信息的激光信号。在由多个发射站组成的测量网络中,如果各发射站的相对位置与姿态关系已经通过标定手段得到<sup>[2]</sup>,则接收器的三维坐标可通过中心计算机被实时解算。为提高操作性,整个测量网络内部的信号传输都是通过无线方式实现。与室内GPS(iGPS)<sup>[3]</sup>和传统的全球定位系统(GPS)相同,这种测量模式实际上是建立了一个从发射站到接收器的单向信息传输通路,利用发射站组成的测量网络形成测量场,只要置于其中的接收器都可被测量,其实质就是将测量消耗分布于每个测点自身,这种分布式的特点原理上可同时测量无限多的待测接收器,真正实现多任务并行测量<sup>[4]</sup>。

对于空间坐标测量系统,测量空间与测量精度是一对不可割裂又相互矛盾的重要指标。扩大测量空间的同时,必然带来测量精度的损失<sup>[4]</sup>。工作空间测量定位系统虽然在原理上可通过增加发射站的方式无限扩大测量空间,但其测量精度并不是均匀地分布于整个空间,此规律在经纬仪测量网络中也同样存在。以双站经纬仪测量系统为例,周维虎已给出求解最佳测量点的方法,其方法是将观测角度值作为自变量对模型方程求导,根据极值存在的必要条件,得到每台经纬在某两个固定的观测角度(水平角和垂直角)上,可观测到测量空间的最佳测量点<sup>[5]</sup>。然而,由前述可知,工作空间测量定位系统在实现角度测量的原理方法上与经纬仪有着比较大的区别,它

是依赖高速旋转的激光扇面来实现角度观测,与经纬仪相比,它的观测过程带有动态特性,发射站旋转头在旋转过程中的震动和偏心等误差源将引入更多的扰动因素而且很难确定<sup>[6]</sup>,所以,如果模仿经纬仪的方法,认为观测过程是静态的且只对观测角度求导进而求解最佳测量点,并不是十分符合实际情况的。基于此,针对系数矩阵中的各项都有扰动的情况,文中提出利用观测方程系数矩阵的条件数作为交会优劣的衡量标准,越小的条件数,代表越稳定的扇面交会,与经纬仪的方法相比,它更贴近工作空间测量定位系统的实际测量过程。

以此为目标进行最优测量点求解,寻优过程中发现,此优化目标并不具备显性的可微方程式,利用传统确定性的优化方法进行寻优很难解决此问题。于是,文中提出引入粒子群算法这种仿生智能算法来替代传统的寻优方法<sup>[7]</sup>。该算法对待优化函数没有任何特别的要求(如可微分、连续等),因而其通用性极强。为进一步验证,文中在最后设计了由两台发射站组成的测量网络的实验平台,利用该方法得到的最佳测点进行连续测量,得到不确定度分布情况,再在若干其他点处用同样的方法采集坐标不确定度,结果表明:在该方法得到的最佳测量点处的坐标综合不确定度最小,而在其他区域的测点综合不确定度呈现变大趋势。

## 1 测量模型与扇面交会评价模型

如图1所示,工作空间测量定位系统的基本组成包括发射站、接收器和一台中心计算机。

对每一个发射站,其上部是转台,转台装有两个与旋转轴线成一定倾角的线激光器,可发出扇面状的激光束;下部是基座为固定部分,基座装有同步脉冲激光器。不同的发射站是靠设置不同的转速来进行区别的。当发射站的转台旋转至每周的初始位置时,基座上的同步脉冲激光器向空间发出短促的同步光信号,接收器感知到此信息后,与其物理相连的

高速信号处理器开始计时, 当任一激光面扫到此接收器时, 高速信号处理器便通过计数脉冲得到该扇面激光从初始位置旋转到当前位置的角度<sup>[8]</sup>。同样的原理, 接收器可得到若干扇面穿过它时的角度信息, 这样, 利用多平面约束原理, 可构建一个虚拟场景, 场景中若干平面穿过同一点, 如图 2 所示。

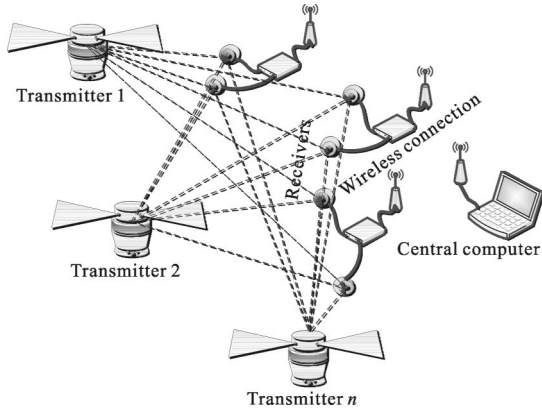


图 1 工作空间测量定位系统的组成

Fig.1 Components of wMPS

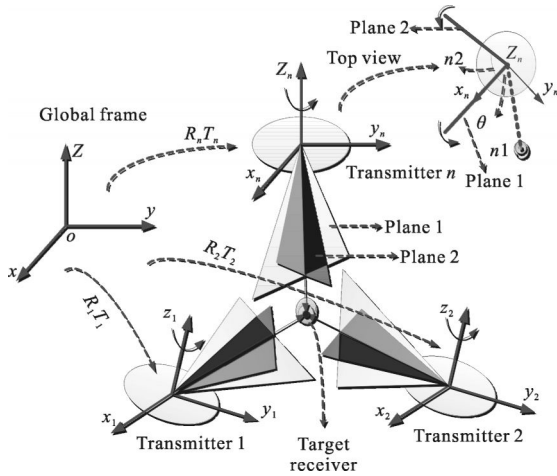


图 2 多平面交会示意图

Fig.2 Intersection of multiple planes

然后, 利用多平面约束, 每一个平面可建立一个方程, 若干个平面方程可建立一个线性方程组, 如下式所示。

$$A_{ij}B_{ij}C_{ij}R_{qij}(R_i[x \ y \ z]^T+T_i)+D_{ij}=0(i=1, 2, 3, \dots, j=1, 2) \quad (1)$$

式中:  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $C_{ij}$  和  $D_{ij}$  代表第  $i$  个发射站的第  $j$  个平面参数, 这里  $j \in \{1, 2\}$  且  $i \in R^+$ 。旋转矩阵

$$R_{qij} = \begin{bmatrix} \cos q_{ij} & -\sin q_{ij} & 0 \\ \sin q_{ij} & \cos q_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示平面绕所在发射站的坐标系  $Z$  轴的旋转;  $q_{ij}$  即第  $i$  个发射站的第  $j$  个平面从此发射站的计时零位到接触到接收器所旋转过的角度;  $R_i$  和  $T_i$  是工作空间测量定位系统的外参数, 它们描述了每个发射站的坐标系与全局坐标系之间的关系, 最后,  $[x \ y \ z]^T$  是要求解的坐标值。

为方便讨论, 公式(1)可变换为以下简单形式:

$$Ax=b \quad (3)$$

式中:  $A$  的每一行是  $A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij} \ R_{qij} \ R_i$ ;  $b$  的每个元素是  $-A_{ij}B_{ij}C_{ij}R_{qij}T_i-D_{ij}$ ;  $x$  是公式(1)中的  $[x \ y \ z]^T$ 。

由该测量系统的带有动态性的测量特点, 可以推知, 任一平面每周旋转到接收器位置时, 除了通过高速电路计时得到的观测角  $q_{ij}$  是一个重要误差项以外<sup>[9]</sup>, 描述每个平面法向量的参数  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $C_{ij}$  都会有由高速旋转的不稳定性带来的扰动, 此扰动的量级虽然一般较小, 但放到几米甚至几十米的距离上, 也会带来较为可观的测量不确定性。

由此可知, 运用传统的只对观测量求导的方式确定最佳测量点并不完全符合此测量系统的特点, 所以, 这里提出用公式(3)中的系数矩阵  $A$  的条件数  $\text{cond}(A)$  最小作为优化目标来确定工作空间测量定位系统的最佳测量点。即寻找一个空间点坐标  $[x \ y \ z]^T$ , 使

$$\min(\text{cond}(A)) \quad (4)$$

式中:  $A$  就是方程(2)的系数矩阵。

为解决此优化问题, 顾及到问题本身的数学特性, 考虑引入智能仿生算法对其进行求解。粒子群算法作为一种 20 世纪 90 年代提出的仿生算法是计算智能领域, 除了蚁群算法、鱼群算法之外的另一种群体智能的优化算法。该算法源于对鸟类捕食行为的研究, 鸟类捕食时, 找到食物最简单的策略就是搜寻当前距离食物最近的鸟的周围区域。这种策略蕴含着智能。该算法的基本特点是对优化目标函数没有连续可微等的解析性要求, 且编程易于实现, 运算效率较高。这些特点完全适合解决文中提出的寻找最佳交会点的问题<sup>[7]</sup>。

## 2 实验验证

为验证上述寻找工作空间测量定位系统的最佳交会点的方法与方案的有效性, 设计实验如图 3 所示。

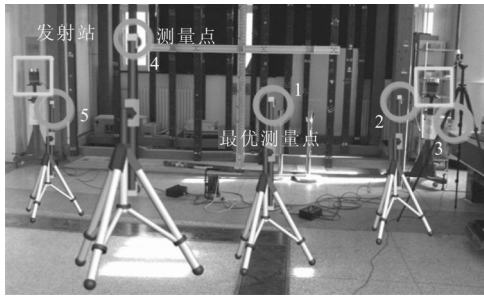


图3 实验设计

Fig.3 Experimental design

如图3所示,利用工作空间测量定位系统的两台发射站组成测量网络,标定得到系统参数后,送入程序解算最佳测点位置;在测量空间挪动装有接收器(被测量点)的三脚架,边挪动边测量,得到可接受的最佳点位置,此点记为1号点,连续测量此点200次,统计得出坐标点位综合不确定度,将对应的解算方程系数矩阵条件数与点位综合不确定度记录下来。再在其他位置取若干测量点,用同样的方法得到其条件数与点位综合不确定度,将所有结果记录到表1。

表1 结果展示(单位:mm)

Tab.1 Results demonstration(Unit:mm)

| Point number       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Condition number   | 1.758 | 2.348 | 2.560 | 2.732 | 3.039 |
| Standard deviation | 0.025 | 0.030 | 0.034 | 0.039 | 0.054 |

如表1所示,表头为测试点号,表的内容分为两行,第一行是对应点解算方程系数矩阵的条件数,第二行是实验得到的其点位稳定性的量化评价指标。在利用该方法计算得到的最佳测量点处,其点位稳定性最好,在区别于此最佳点的位置随机设置测量点,得到的结果稳定性变差。此实验结果说明了文中所提方法的有效性。

### 3 结论

在十几米到几十米的测量空间内,奢求空间内精度均匀一致最优基本是很难实现的,这样,寻求空间内精度指标最优的位置就具有一定的价值和意义。首先,它帮助更深刻地认识了测量精度在空间内的分布情况,其次,它对有效利用精度最佳的测量区

域提供了理论和实现途径,最后,针对具体的大部件测量任务,它对实现最佳发射站布局提供了有益的线索和铺垫。

工作空间测量定位系统是一种基于旋转激光扫描平面前方交会的分布式的大尺寸测量定位系统,在测角功能和分布式特点上与经纬仪系统相类似。但与经纬仪主要相区别的是:工作空间测量定位系统的角度观测具有较为明显的动态特点,而经纬仪是静态瞄准观测;这一点主要区别决定了工作空间测量定位系统的扰动因素更多,也更难量化确定,所以文中提出了利用解算方程条件数的大小来刻画某测量点位置的抗扰动能力,也就是说,条件数小的位置,其方程制约性强,病态性弱,自然抗扰动能力就高;而其他位置的方程制约性相对较差,其抗扰动能力相对较差。而在解算方法上,文中针对此数学模型问题本身的复杂性,提出利用粒子群算法进行优化求解,分析与实践表明,粒子群算法的特点与优势正适合解决这样一类问题。为验证文中所提出的方法与对工作空间测量定位系统的动态性观测的认识,设计了简单的验证实验,实验结果表明:文中提出的方法有效、正确可行,同时也为今后的发射站布局问题研究打下一个基础。

### 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)  
杨凌辉, 郝继贵, 魏振忠, 等. 工作空间测量定位系统定向参数修正方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1629-1634.
- [2] 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)  
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.
- [3] 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.
- [4] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, et al. Distributed

- Large-Scale Ddimensional Metrology: New Insights [M]. London: Springer, 2011.
- [5] Zhou Weihu. Research on the precision theory of large-scale coordinate measuring systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000.  
周维虎. 大尺寸空间坐标测量系统精度理论若干问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000.
- [6] 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)  
端木琼, 杨学友, 郝继贵, 等. 基于光电扫描的三维坐标测量系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2014–2019.
- [7] Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 201–203.
- [8] 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, 36(6): 1105–1109. (in Chinese)  
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, 36(6): 1105–1109.
- [9] Xiong Zhi, Zhu Jigui, Geng Lei, et al. Verification of horizontal angular survey performance for workspace measuring and positioning system[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(2): 291–296. (in Chinese)  
熊芝, 郝继贵, 耿磊, 等. 室内测量定位系统水平测角性能的检定[J]. 光电子·激光, 2012, 23(2): 291–296.