

工作空间测量定位系统加权问题研究

任永杰¹, 薛彬², 杨凌辉¹, 赵子越¹, 郝继贵¹

- (1. 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;
2. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 工作空间测量定位系统(workspace Measuring and Positioning System, 简称 wMPS)是一种基于旋转激光扫描平面定位技术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。作为一种分布式系统, 工作空间测量定位系统也存在着为不同测量节点分配权重的问题。考虑到在定位过程中误差的复杂性, 提出一种根据不同测量区域, 利用统计数据对不同测量节点动态分配权重的分权方法。为验证此方法, 设计了对比实验, 实验结果表明: 文中提出的加权方法可显著提高工作空间测量定位系统的测量精度。

关键词: 工作空间测量定位系统; 动态加权; 解算方法

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0668-05

Study on the problem of weighting for the workspace measuring and positioning system

Ren Yongjie¹, Xue Bin², Yang Linghui¹, Zhao Ziyue¹, Zhu Jigui¹

- (1. State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The workspace Measuring and Positioning System (wMPS) is an indoor large-scale positioning system based on rotating laser planes. It can provide 3D coordinates with metrological accuracy, applicable in manufacturing and assembly. As a distributed positioning system, the wMPS also has problem with assigning weights to different measuring nodes. Considering the complexity of the error sources in the positioning process, a method which uses statistics to assign different weights to different nodes was proposed according to different measuring areas. To validate the efficacy, the experimental results are presented to show that the proposed approach can improve the measurement accuracy significantly.

Key words: workspace measuring and positioning system; dynamic weighting; solution method

收稿日期: 2014-06-09; 修订日期: 2014-07-12

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。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。Email: jiguizhu@tju.edu.cn

0 引言

工作空间测量定位系统是一种模块化、大尺寸跟踪测量系统,能在工厂车间内实现多目标、实时高精度的定位测量^[1]。它的主要组成部分包括由激光发射站构成的测量网络,代表被测点的接收器,和一台中心计算机。更具体地说,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位置信息的激光信号。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通过标定手段得到^[2],则接收器的三维坐标可通过中心计算机被实时解算。整个测量网络内部的信号传输是通过无线方式实现的,这样有利于给操作者带来更好的移动便携性。与室内GPS(iGPS)^[3]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,好处是在发射站组成的测量网络中,理论上可同时测量无限多的待测接收器^[4]。

一般来讲,接收器的三维坐标是通过解算由测量观测值、系统参数组成,且利用多平面约束思想构建的超定线性方程组来得到的^[5]。对这种超定方程组,一般的方法是利用高斯-马尔可夫定理^[6]进行计算,但是高斯-马尔可夫定理的使用前提是系数矩阵的各项要符合独立同分布的条件,但是从建立的方程组可以看到,它并不严格符合这样的条件,盲目使用此定理,得到的结果并不是最优。此文中,立足于研究解决工作空间测量定位系统的加权问题,重新变形该解算方程,利用最优化原理只对观测值进行平差优化^[7],得到更优解的同时,也为解决测量系统的分权问题打下基础。

工作空间测量定位系统本质上是一种分布式的测量系统,为每个测量节点分配合理的权重,是一个重要的也是内在的问题,因为每个测量节点的测量性能并不能保证是一致的。通过提前检定每个发射站的测量精度^[8],根据此精度指标为每个发射站的方程分配一个固定权值是一个简单易行的方法,但是,实现测量过程中,每个发射站到接收器的单向信息

传输通路并不只和发射站有关,它还和每个发射站的激光平面的光强分布均匀性、激光器的最佳工作距离等因素有关。如此导致在不同的测量区域,每个发射站的每个激光平面提供的权值是动态变化的。基于此分析,在文中提出一种基于统计方法的动态分配权值技术,即固定若干接收器于测量网络的不同测量空间内,每个接收器负责提供此测量空间内各激光平面动态波动程度,待测接收器利用与其相邻最近的固定接收器提供的动态波动情况,为它的此次测量分配权重。显然,这种根据不同测量空间的动态分配权重的方法更接近于实际的测量情况。

为验证这种动态分权技术的优势,文中在最后一章设计了实验,实验中一组数据使用了传统的解算方法,即使用高斯-马尔可夫定理且不考虑权重,另一组数据利用文中提出的只对观测值进行最优计算且使用了动态分配权重的方法,两组数据分别与激光跟踪仪测得的数据对比,结果表明,使用文中提出的方法,得到的数据具有更高的精度,即更接近于跟踪仪得到的测量结果。

1 解算方程的确定与变形

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。

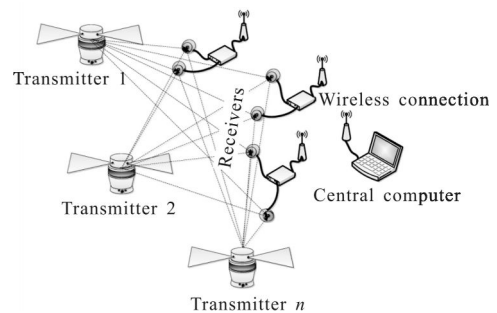


图1 工作空间测量定位系统的组成

Fig.1 Components of the wMPS

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^[9]。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。

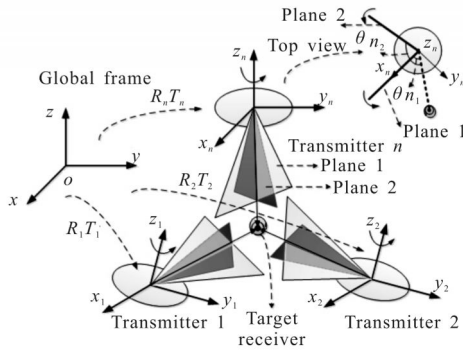


图 2 多平面交会示意图

Fig.2 Intersection of the multiple planes

其中, 图 2 右上角俯视图是在接收器所在高度进行平行截取得到的, 它对单发射站的两个扫描角的获取做了清楚的展示。

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。

$$[A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij}]R_{\theta_j}(R_i[x \ y \ z]^T+T_i)+D_{ij}=0, \quad (1)$$

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

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 $i \in \mathbb{N}^+$; 旋转矩阵 $R_{\theta_j} =$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 \\ \sin\theta_j & \cos\theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表示平面绕所在发射站的坐标系

Z 轴的旋转, θ_j 在图 2 的右上角的俯视图做了解释, 即第 i 个发射站的第 j 个平面从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。

$$Ax=b \quad (2)$$

式中: A 的每一行是 $[A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij}]R_{\theta_j}R_i$; b 的每个元素是

$-[A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij}]R_{\theta_j}T_i-D_{ij}$; x 是公式(1)中的 $[x, y, z]^T$ 。

一般求解如公式(2)所示的方程组, 习惯采用高斯-马尔可夫定理, 即 $x=(A^T A)^{-1}A^T b$, 但是事实上, 矩阵 A 只受观测值 θ_j 的扰动影响, 所以此方程组并不满足高斯-马尔可夫定理的使用前提条件, $x=(A^T A)^{-1}A^T b$ 也并不是最优的估计值。为了求得只针对观测值的最优估计解, 方程(1)可变形为以下形式:

$$\theta_j = \arcsin\left(\frac{-C_{ij}z_i - D_{ij}}{\sqrt{(-A_{ij}y_i + B_{ij}x_i)^2 + (A_{ij}x_i + B_{ij}y_i)^2}}\right) - \varphi_{ij} \quad (3)$$

式中: $j \in \{1, 2\}, i \in \mathbb{N}^+$; $[x_i \ y_i \ z_i]^T = R_i[x \ y \ z]^T - T_i$ 且 $\tan\varphi_{ij} = \frac{A_{ij}x_i + B_{ij}y_i}{-A_{ij}y_i + B_{ij}x_i}$ 。

令

$$f_{ij}(x, y, z) = \arcsin\left(\frac{-C_{ij}z_i - D_{ij}}{\sqrt{(-A_{ij}y_i + B_{ij}x_i)^2 + (A_{ij}x_i + B_{ij}y_i)^2}}\right) - \varphi_{ij} - \theta_j \quad (4)$$

则此问题变为一个非线性最小二乘问题, 即寻找 $[x \ y \ z]^T$ 以最小化下式为:

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n f_{ij}^2(x, y, z) \quad (5)$$

式中: n 表示测量中发射站的个数。

显然, 这种变形使得优化目标变为观测值而不是系数矩阵 A 和向量 b 的所有元素, 这将更符合真实的测量过程, 也为下面要分析的加权问题做好了铺垫。

2 工作空间测量定位系统的加权方法

如前言中提到, 权重的确定不仅受到单发射站的测量精度影响, 也受到激光的最佳工作距离、激光的光强分布等等因素的影响。换句话说, 测量网络所构成的测量场中的不同空间区域的测量环境是不同的, 应该分配的权重也是不一样的。所以, 文中采用如图 3 所示的方式进行权重值的动态获取。

如图 3 所示, 在整个测量空间内固定若干接收器, 每个接收器负责自己所在区域的权重的获取。被测接收器在哪个测量区域内采点, 就利用哪个区域的动态权重值为此点加权。当然, 整个测量空间分得越细越好。因此, 公式(5)可改写成如下带有权重的形式:

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n (w_{ij} f_{ij}(x, y, z)) \quad (6)$$

式中: w_{ij} 是对应观测值 θ_j 的动态权重。

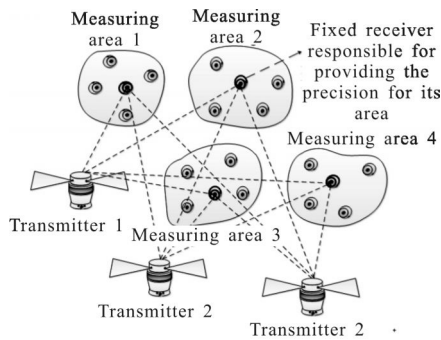


图3 根据不同测量空间动态获取权重值

Fig.3 Acquiring dynamic weights according to different areas

3 实验验证

为验证上述动态加权方法的有效性,设计实验如图4所示。

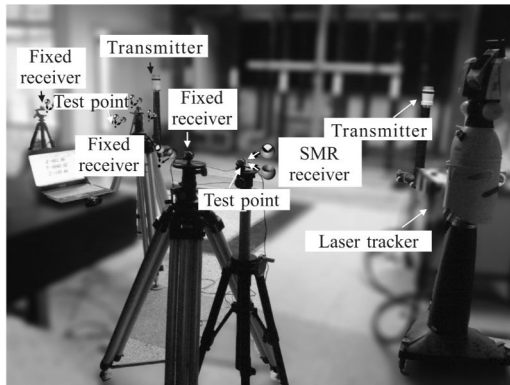


图4 实验设计

Fig.4 Experimental design

如图4所示,激光跟踪仪用来提供真值做对比基准,此外,须提及,激光跟踪仪的球形固定反射器(Spherically Mounted Reflector, SMR)和工作空间测量定位系统的接收器直径都是38.1 mm,这样的设计方便了坐标值的比对。

利用两台发射站组成测量网络,在测量空间的三个不同区域内分别固定一个接收器用来负责提供此区域的动态权值,同时利用工作空间测量定位系统和激光跟踪仪在三个区域内一共采集五个测量点,分别用传统的方法和文中提供的方法计算坐标值,再将两组结果分别与跟踪仪得到的坐标值进行比对,得误差结果如表1所示。

表中数据代表测试点的坐标值与跟踪仪测得坐标值的距离差,此差作为评价精度的指标。如表1所示,第二行数据是用传统方法得到的误差值,第三行

是用文中提出的加权方法得到的误差值,可看出,利用文中提出的加权方法得到的误差值整体小于传统方法的得到的误差值。此结果,也说明了文中所提出的解算方法和动态加权方法的有效性。

表1 误差比对(单位:mm)

Tab.1 Error comparison (Unit: mm)

	P1	P2	P3	P4	P5
Traditional	0.314	0.191	0.168	0.271	0.125
Weighting	0.247	0.156	0.103	0.070	0.055

4 结论

工作空间测量定位系统是一种分布式的大尺寸测量定位系统,其分布式的特性表达了它需要给不同测量节点进行分权的内在需求。而传统的分权思想,即利用发射站的精度指标给每个观测值分配固定的权重,是一种机械的理想解决思路,这种解决问题的思路是基于理想的测量模型的,而实际的测量过程中误差源存在于每一个环节,而且并不固定,这样,分配固定权值就并不十分很吻合实际情况。从实际测量情况出发,文中提出了动态分配权重的思想,即将测量空间分割成不同的测量区域,每个测量区域的测量环境基本稳定,在每个测量区域内固定一个接收器专门负责实时监控此空间的测量环境状态,待测接收器位于哪个测量区域,就利用哪个区域的实际波动动态指定权值,这样,得到的结果更符合实际情况,实验数据也表明,结果具有更高的精度。

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 dimensional metrology: new insights[D]. London: Springer, 2011.
- [5] 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.
- [6] Kruskal W. When are Gauss-Markov and least squares estimators identical? A coordinate-free approach [J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1968, 39: 70-75.
- [7] Survey Adjustment Group in School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)
武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [8] 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.
- [9] 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.