

大尺度线结构激光面的非参数模型标定方法

林嘉睿, 孙佳蕾, 张饶, 郑书彦, 郝继贵*

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 精确结构光模型是三维光学测量的前提, 其中分布式空间测量定位系统的交会模型是以线结构激光面的理想平面模型为基础的。而大尺度空间下的线结构激光面存在复杂变形, 且很难用任何数学模型来精确拟合。因此, 研究了一种基于高精度转台的线结构激光面非参数模型标定方法, 建立了激光面旋转时间与空间角度间的精密映射表, 替代了曲面拟合参数模型, 并在激光面非参数标定的结果基础上对交会模型进行了优化。以室内空间测量定位系统为验证平台, 实验结果表明该标定方法能够有效克服激光面复杂变形问题, 可将 12 m 测量范围内变形较为明显区域的坐标测量误差减少约 50%。

关键词 测量; 线结构激光面; 非参数模型; 室内空间测量定位系统; 大尺度

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1612001

Nonparametric Model Calibration Method for Large-Scale Line-Structured Laser Surface

Lin Jiarui, Sun Jialei, Zhang Rao, Zheng Shuyan, Zhu Jigui*

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

Abstract A precise structured laser model is the basis of three-dimensional optical measurement, in which the intersection model of distributed spatial measurement positioning system is based on the ideal plane model of the line-structured laser surface. However, the line-structured laser surface in large-scale space has complex deformation which is difficult to be accurately fitted by any mathematical model. Therefore, this paper studies a nonparametric model calibration method for the laser surface based on a high-precision rotary table. This method constructs a precise mapping table between the rotation time of laser surface and the space angle to replace the surface fitting parameter model. Based on the nonparametric calibration results of laser surface, the intersection model is optimized. Taking workshop measurement positioning system as the verification platform, the experimental results show that the calibration method can effectively overcome the complex deformation of laser surface and reduce coordinate measurement error of the areas with obvious deformation to approximately 50% within a measuring range of 12 m.

Key words measurement; line-structured laser surface; nonparametric model; workshop spatial measurement positioning system; large-scale

OCIS codes 120.3940; 120.4640; 150.3045; 150.1488

1 引言

面向大型装备多部件协同、高效制造过程的实时信息获取对多任务并行测量定位技术提出了迫切需求^[1]。多基站室内空间测量定位系统通过精密旋

转结合多激光扫描的方式, 将空间方位角度信息转换为高稳定时间序列的相位特征, 具备了高精度、多目标、自动化测量的特点, 近年来应用十分广泛^[2-4]。该分布式测量系统采用线结构激光面实现对被测空间的覆盖, 并作为发射端与接收端间的传感载体来

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51775380, 51835007, 51721003)

通信作者: jiguizhu@tju.edu.cn

实现精确的光电转换。

室内空间测量定位系统(如 iGPS、wMPS)^[5-6]对于系统测量精度的研究主要涉及单元测角精度评估^[7]、测站布局优化^[8]以及系统动态性能^[6,9]等方面,而关于仪器单元环节所带来影响的研究正在逐步开展,包括轴系旋转速度的稳定性^[10],其匀速光场扫描是实现高精度测角的重要基础,而作为光场载体的扫描激光面特征又是多站角度交会测量模型的核心。

在小尺度范围内的线结构激光面模型标定研究中均将光面视为理想平面^[11],现有的室内空间测量定位系统角度交会模型也是基于平面模型建立的^[12-13]。然而已有研究证实,激光器自身光源特性以及内部柱面镜在装配过程中出现的误差会影响光条能量中心线的直线度^[14-15],直线度偏差会随着激光面在空间中尺度的延伸而增大,进而光面在大尺度范围的变形不容忽视。基于高精度转台的视觉评估实验证实该变形趋势呈现非线性且边缘处变形严重^[16],因此如何建立实际激光面的精确特征模型以减小系统测量误差成为了亟待解决的问题。

已有研究都在探寻更为准确且高效的参数模型以提高实际激光面与模型间的拟合效果,参数模型是指整体服从某种分布而建立确定参数方程的模型,其精确建立往往依赖于空间控制条件的精度、密度和范围^[17]。其中激光面线性折面模型^[16]可在一定范围内拟合偏差情况,进一步提升拟合效果但增加折面数目则会引入大量待解算参数;建立二次曲面模型^[18]可对类抛物线形光面进行较为准确的描述,改善边缘范围拟合效果,而对于复杂的类波浪形光面,采用更为精确的高阶模型^[19],则同样会大幅降低系统解算效率。

在视觉测量领域,为提高相机畸变参数模型的标定精度,相关学者研究了基于高精度物理基准的非参数模型校准原理^[20-21],非参数模型是指无需确定分布形式的数学模型,避免了标定精度与模型内部参数的相关性。本文针对激光面变形复杂、参数模型难以精确拟合的问题,借助高精度转台构建大范围精密角度基准控制场,直接建立激光面旋转时间与测量角度之间的转换关系,研究了一种室内空间测量定位系统光电传感的时空精密映射非参数模型标定方法,对系统模型进行优化,进而减小系统角度交会测量误差。该方法无需调整被测参考点与激光面间的位置关系,并可通过调整转台旋转幅度来实现标定空间和精度的灵活配置,可适应不同的测量任务及基站。以天津大学精密测试技术及仪器

国家重点实验室研制的 wMPS 系统为实验平台,验证了所研究方法的有效性。

2 系统测量原理

室内空间测量定位系统(以 wMPS 为例)主要由发射站和接收器两部分组成,测量原理^[13]如图 1 所示,发射站向测量空间中发射 2 束绕竖直转轴匀速旋转并相互成一定角度的线结构激光面,每当扫描激光面旋转至预定初始位置时发射站发射光脉冲作为同步标记信号,被固定在待测目标上的接收器依次接收同步标记信号和发射站激光面信号。其中两激光面的平面参数模型表示为

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

其坐标系定义如下:两激光面旋转轴定义为坐标系 Z 轴;激光面 1 与 Z 轴的交点定义为原点 O ;坐标系 X 轴穿过原点以及初始位置处激光面 1 且与 Z 轴垂直;最终根据右手定则确定 Y 轴。(1)式中 a 、 b 、 c 、 d 为发射站内激光面的常规平面模型参数。

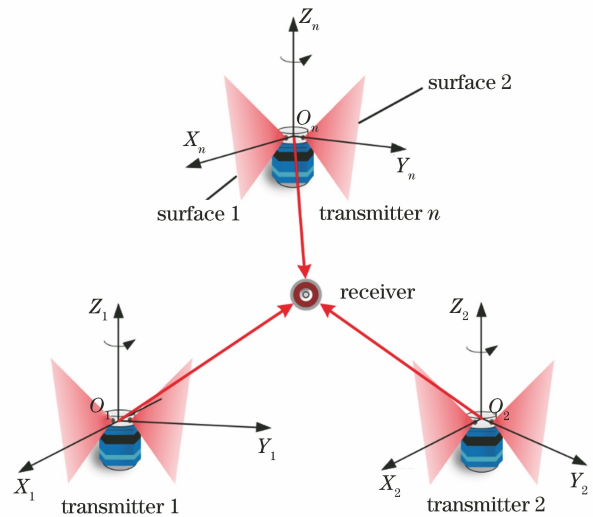


图 1 wMPS 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wMPS measurement principle

如图 2 所示,系统单站角度测量过程中,根据接收器 P 接收到的同步及扫描信号时间差(同步信号时间 t_0 与光面旋转时间 t_1 、 t_2 间差值)以及预先标定的激光面平面模型参数,可以计算接收器相对于发射站坐标系的水平角 α 及俯仰角 β ^[13]

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left[\frac{\sin \theta_1 \tan \varphi_2 - \sin(\theta_2 - \theta_{\text{off}}) \tan \varphi_1}{\cos \theta_1 \tan \varphi_2 - \cos(\theta_2 - \theta_{\text{off}}) \tan \varphi_1} \right] \\ \beta = \arctan \left[\frac{\sin(\theta_1 - \alpha)}{\tan \varphi_1} \right] \end{cases}, \quad (2)$$

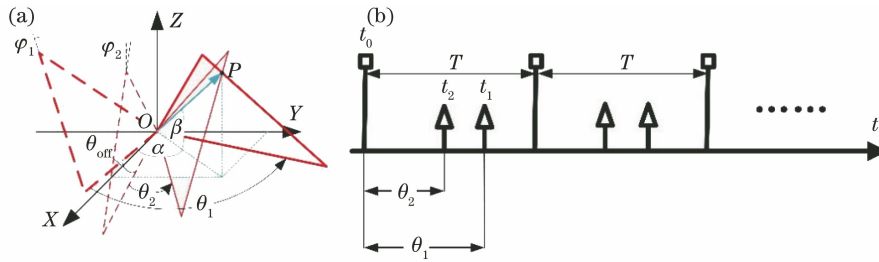


图 2 角度测量模型

Fig. 2 Angle measurement model

式中： φ_1 和 φ_2 表示两激光面与竖直方向的夹角（即倾角），其由(1)式中平面方程解得； θ_{off} 表示初始位置处两激光面在 XOY 面上的夹角； θ_1 和 θ_2 表示两激光面相对于初始位置旋转过的角度，表示为

$$\begin{cases} \theta_1 = 2\pi(t_1 - t_0)/T \\ \theta_2 = 2\pi(t_2 - t_0)/T \end{cases} \quad (3)$$

全周向扫描的激光面可对空间中多个目标点进行并行测量，此种以时间测量为基础的多目标测角方式相较于传统单目标测角方式具有成本低、效率高等优势。为实现待测点空间三维坐标测量需要多发站间进行角度交会定位，通常借助基准尺或三维控制场对发射站间的位姿参数进行精确标定。在交会过程中，被视为理想平面的激光面用于构建交会定位的数学模型可以表示为

$$F = [a_i \quad b_i \quad c_i \quad d_i] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{ij})^T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{T}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (4)$$

式中， \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i 分别为第 i 个发射站坐标系与世界坐标系间的旋转矩阵和平移矩阵， θ_{ij} 为激光面由初始位置旋转至第 j 个被测点位置的旋转角度，其旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R}(\theta_{ij}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ij} & -\sin \theta_{ij} & 0 \\ \sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在发射站激光面模型参数及发射站间外参经预先标定的情况下，测得任意待测点所对应的旋转时间，即可确定其空间坐标值 $(x_j, y_j, z_j)^T$ 。由 wMPS 的测量原理可知，被视为理想平面的激光面是发射站与光电接收器之间的传感载体，因此实际光面与现有理想平面模型的贴合程度直接影响系统的测角精度及定位性能。由图 3 可知，当激光面与平面模型存在偏差时，光面实际扫过被测点的位置

为 P ，然而根据预先标定的激光面平面模型确定的位置却为 P' ，此时两点间的偏差即为光面变形所带来的系统误差，为减小此误差对测量性能的影响，建立一种高效、准确的激光面标定方法成为了亟待解决的问题。

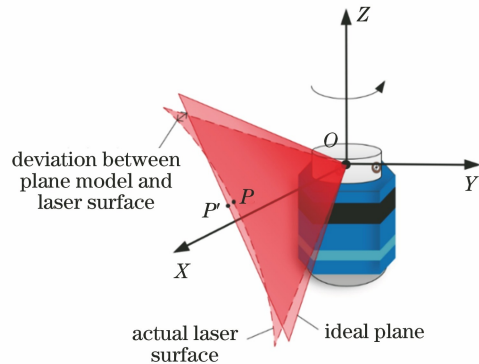


图 3 平面模型偏差对测量精度的影响

Fig. 3 Influence of plane model deviation on measurement accuracy

3 非参数模型标定方法

3.1 基于高精度转台建立非参数模型

根据 wMPS 测量原理，发射站内部参数的标定本质上是空间测量角度与旋转扫描时间之间的关系建立过程。针对激光面变形复杂、参数模型难以精确拟合的问题，研究了一种直接建立被测点所对应旋转时间与测量角度间映射关系的标定方法。

如图 4 所示，在非参数模型标定过程中，使用高精度转台提供二维的精密角度基准带动发射站实现两个自由度上的旋转，因此通过精密工装将发射站固定在精密转台内框上，使得发射站坐标系原点与转台坐标系原点基本重合，同时将接收器固定在转台正前方稳定实验平台上。对精密转台处于初始位置时激光面扫过接收器的旋转时间 t 进行测量，以一定角度间隔在一定范围内调整内框的角度（即水平角 α ），每次调整后均精密调整外框角度（即俯仰

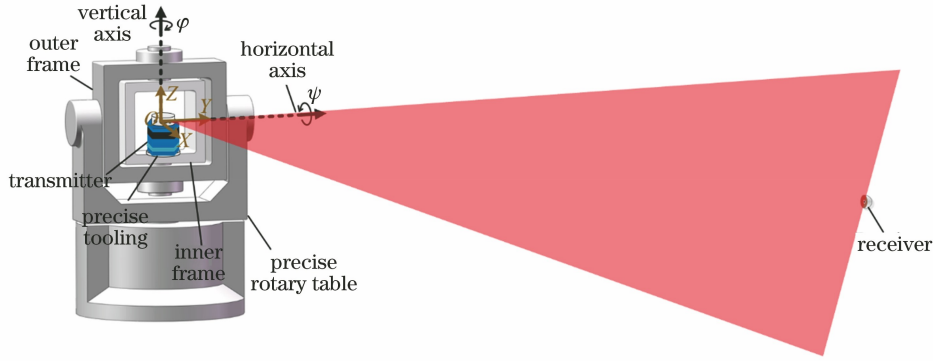


图 4 非参数模型标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of nonparametric model calibration

角 β) 以保证激光面测得的旋转时间不变, 相当于激光面被固定在某角度。在一定范围内改变精密转台的初始水平角度, 重复上述角度调整步骤即可得到由旋转时间-激光面构成的标定网格, 每条曲线对应激光面某固定旋转时间且其由多组测量角度拟合而成。

如图 5 所示, 基于非参数标定结果对测量空间中任意被测点的空间角度进行测量时, 被测点 P 必定位于四条标定曲线之间, 其中两条为激光面 1 所对应的标定线 (t_{1a}, t_{1b}), 另外两条为激光面 2 所对应的标定线 (t_{2a}, t_{2b})。

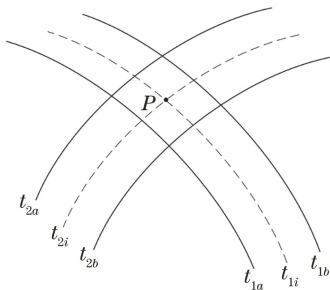


图 5 空间角度组合解算原理

Fig. 5 Calculation principle of spatial angle combination

依据测量得到的旋转时间 t_i 以及标定得到的映射表计算该时间所对应的一系列空间角度组合, 由于标定时曲线所对应的时间间隔很小, 可对其进行线性解算得到

$$\begin{cases} \frac{t_{1b} - t_{1a}}{t_{1i} - t_{1a}} = \frac{\beta_{1b} - \beta_{1a}}{\beta_{1i} - \beta_{1a}} \\ \frac{t_{2b} - t_{2a}}{t_{2i} - t_{2a}} = \frac{\beta_{2b} - \beta_{2a}}{\beta_{2i} - \beta_{2a}} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \beta_{1i} = \frac{(\beta_{1b} - \beta_{1a})(t_{1i} - t_{1a})}{t_{1b} - t_{1a}} + \beta_{1a} \\ \beta_{2i} = \frac{(\beta_{2b} - \beta_{2a})(t_{2i} - t_{2a})}{t_{2b} - t_{2a}} + \beta_{2a} \end{cases}. \quad (7)$$

经解算可以得到空间中待测点 P 所对应两激

光面的空间角度组合信息, 依据上述角度组合信息, P 点必定位于四组角度组合所组成的四边形中, 如图 6 所示。

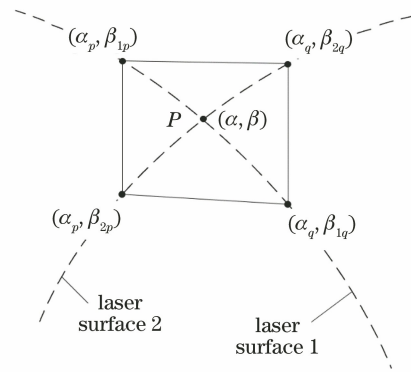


图 6 待测点空间角度解算原理

Fig. 6 Calculation principle of spatial angle of point to be measured

假设测量空间中待测点 P 所对应的空间角度为 (α, β) , 其四周的角度组合分别为 (α_p, β_{1p}) 、 (α_p, β_{2p}) 、 (α_q, β_{1q}) 、 (α_q, β_{2q}) , 其角标中 1 和 2 表示激光面对应的编号, p 和 q 表示不同水平角的编号且 α_p 与 α_q 的差值为标定角度间隔。由于标定角度间隔足够小, 可近似认为 P 点在两对角线的交点上, 两对角线直线方程可由四组角度组合确定

$$\begin{cases} \beta = \frac{\beta_{1q} - \beta_{1p}}{\alpha_q - \alpha_p} \cdot \alpha + \frac{\alpha_q \beta_{1p} - \alpha_p \beta_{1q}}{\alpha_q - \alpha_p} \\ \beta = \frac{\beta_{2q} - \beta_{2p}}{\alpha_q - \alpha_p} \cdot \alpha + \frac{\alpha_q \beta_{2p} - \alpha_p \beta_{2q}}{\alpha_q - \alpha_p} \end{cases}. \quad (8)$$

为解算待测点相对于发射站的水平角及俯仰角, 将两直线方程联立, 其交点坐标即为待测点的空间角度, 表示为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{l_2 - l_1}{k_1 - k_2} \\ \beta = \frac{k_1 l_2 - k_2 l_1}{k_1 - k_2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中, k 和 l 由对角线直线方程确定, k 为直线斜率, l 为截距。

当非参数模型标定范围满足大尺寸测量需求且标定曲线间隔足够小时, 可以采用线性算法解算标定范围内任意待测点相对于发射站坐标系的空间角度。此标定方法可直接建立测量值旋转时间与空间角度间的精密映射关系, 无需对激光面进行参数模型标定, 从根本上避免了参数模型无法准确拟合激光面的问题。

3.2 空间角度交会模型优化

在常规基于平面模型测量系统中, 依据激光平面的交会约束解算待测点空间三维坐标, 无法避免实际光面与理想平面存在偏差而引入的测量误差。然而, 发射站激光面的非参数模型标定相当于将光面进行多段标定, 可以在很大程度上减小激光面变形对系统测量精度的影响, 尤其针对非线性的复杂变形更为有效。因此以非参数模型标定及解算算法为基础优化空间角度交会模型, 构建多发射站间角度交会约束以实现空间目标点的精确三维坐标测量。如图 7 所示, 以激光面非参数模型标定结果为依据, 结合激光面扫过待测点的旋转时间确定待测点相对于发射站坐标系的空间角度(水平角和俯仰角)。

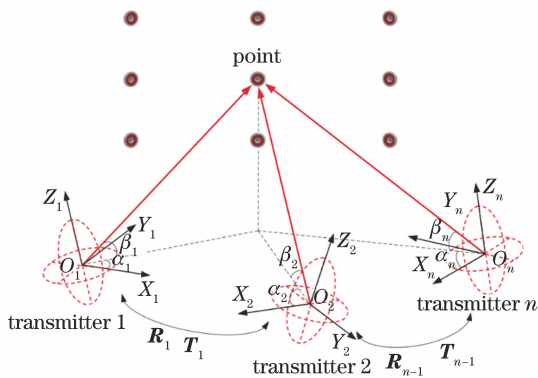


图 7 空间角度交会测量模型

Fig. 7 Spatial angle intersection measurement model

在将发射站 1 坐标系视为世界坐标系的前提下建立基于激光面非参数模型标定的空间角度交会测量模型, 表示为

$$\begin{cases} y_n = x_n \tan \alpha_n \\ z_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \tan \beta_n \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{n-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{n-1}, \quad (11)$$

式中, $(x_n, y_n, z_n)^T$ 表示被测点在第 n 个发射站坐标系下的坐标值, \mathbf{R}, \mathbf{T} 为发射站坐标系间的外参值

(即旋转平移关系)。为解算被测点的空间三维坐标, 将其视为待优化值建立约束方程

$$\begin{cases} F_{mn1} = y_{mn} - x_{mn} \tan \alpha_{mn} = 0 \\ F_{mn2} = z_{mn} - \sqrt{x_{mn}^2 + y_{mn}^2} \tan \beta_{mn} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中, $(x_{mn}, y_{mn}, z_{mn})^T$ 为空间中第 m ($m=1, \dots, M$) 个待测点相对于发射站 n ($n=1, \dots, N$) 坐标系的坐标值, 其为待优化的解算量且各坐标值间关系由发射站间的外参值决定, 待测点相对于任意发射站坐标系的空间角度为已知的测量值。建立目标函数

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (F_{mn1} + F_{mn2}) = \min, \quad (13)$$

得到待测点坐标值的最优解。

为验证此标定方法对提升系统测量精度的有效性, 将其解算结果与传统平面模型方法作比较。以激光跟踪仪测得的坐标值 $(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0})^T$ 为真值, 分别在跟踪仪坐标系下进行坐标测量误差验证:

$$\Delta d = \sqrt{(x_{m0} - x_m)^2 + (y_{m0} - y_m)^2 + (z_{m0} - z_m)^2}. \quad (14)$$

4 实验与分析

4.1 基于高精度转台的激光面非参数模型标定

以天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室研制的 wMPS 为实验平台, 使用的仪器器材主要包括高精度转台(角定位精度为 $\pm 1''$)、精密工装、激光面变形较为明显(经激光面变形评价后)的 wMPS 发射站^[16]及接收器, 其中发射站通过精密工装固定在转台上, 接收器固定在大理石实验平台上正对发射站初始位置, 实验场景如图 8 所示。

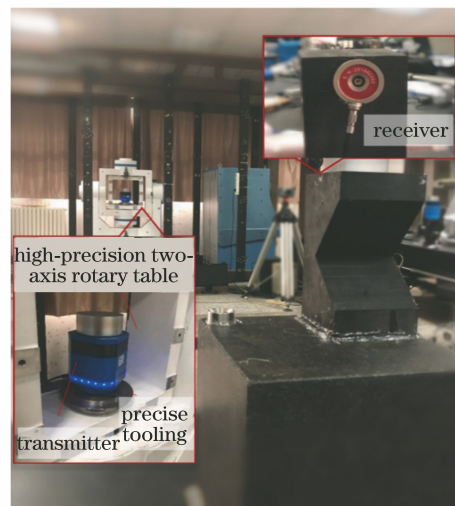


图 8 非参数模型标定实验场景

Fig. 8 Experimental scene of nonparametric model calibration experiment scene

实验过程包括如下步骤:调整高精度转台的水平角和俯仰角,使其初始值均为 0° ,记录发射站中激光面 1 扫过接收器时的旋转时间 t_1 ;根据 wMPS 测量范围及测量精度调整转台的水平角范围及间隔(如以 1° 为间隔由 -15° 调整至 15°),每调整一次水平角,需同时精密调整转台的俯仰角以保证此激光器所发射的激光面 1 扫过接收器的旋转时间不变,记录一系列对应于此旋转时间的水平角和俯仰角的映射表;之后同样以系统测量范围及精度为依据,调整转台的初始水平角(相当于调整映射表中的旋转时间),重复上一步骤即可完成对激光面 1 的旋转时间-空间角度映射表的建立;重复标定步骤完成发射

站中激光面 2 旋转时间-空间角度映射表的建立;从而得到 wMPS 发射站两激光面的标定映射表,为后续的测量定位中解算任意位置被测点的角度信息提供数据基础。

以上述实验步骤为依据,进行了多个发射站的非参数模型标定。在后续精度验证实验场景中,wMPS 双站交会测量范围覆盖 $12\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4\text{ m}$,在标定实验中取其水平角度范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,俯仰角度范围为 $-12^\circ \sim 12^\circ$,角度间隔为 1° ,标定距离约为 6 m ,图 9 即为空间角度交会测量实验中所采用的两个发射站的标定结果,共有 1440 组水平角-俯仰角组合数据。

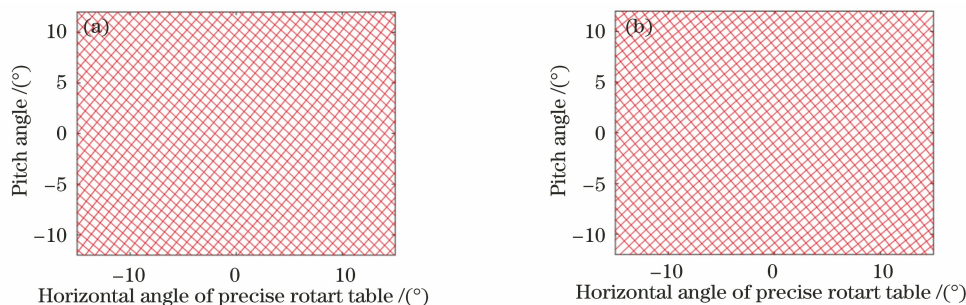


图 9 发射站非参数标定结果。(a)发射站 1;(b)发射站 2

Fig. 9 Nonparametric calibration results of transmitters. (a) Transmitter 1; (b) transmitter 2

4.2 基于非参数模型标定的空间角度交会测量

在完成发射站激光面非参数模型标定的基础上进行了空间角度交会测量实验,在实验空间 ($12\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4\text{ m}$) 内均匀布设 18 个待测接收器(尺寸与激光跟踪仪 3.81 cm 反射靶球一致),如图 10 所示,其中 1~11 号接收器布设在距离为 $4 \sim 8\text{ m}$

且与发射站几乎等高的大理石台上,12~18 号接收器布设在距离约为 12 m 、高度约为 3 m 的墙面上,以验证新内参模型对于光面两端非线性变形的修正效果,基准尺用于两个发射站坐标系间外参确定,激光跟踪仪 (Leica-AT901) 用于系统坐标测量误差验证。

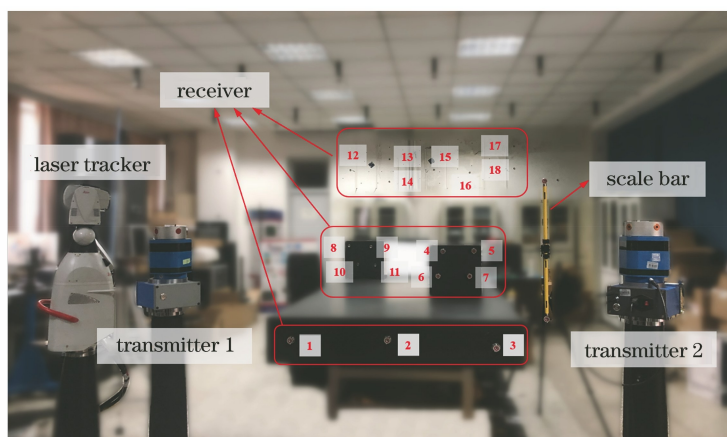


图 10 空间交会测量实验场景图

Fig. 10 Experimental scene of space intersection measurement

分别采用非参数模型以及(1)式中常规平面参数模型作为系统内部参数,对各待测接收器坐标进行多次测量,以激光跟踪仪测得的三维坐标作为基

准值,采用(14)式计算得到图 11 所示的坐标测量误差对比图。

对多组实验结果进行分析可知,所研究方法稳

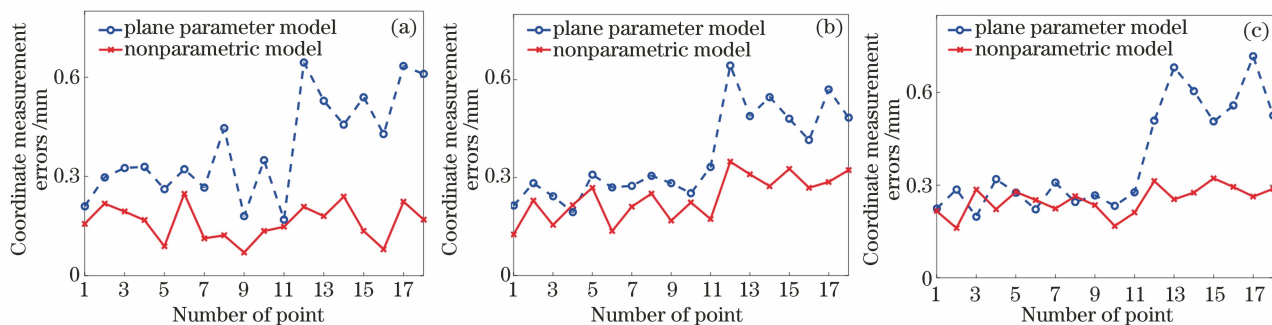


图 11 坐标测量误差对比。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3

Fig. 11 Coordinate measurement error comparison. (a) Experiment 1; (b) experiment 2; (c) experiment 3

定性较好,基于非参数模型标定结果,1~11号待测点所处区域激光面变形不明显,坐标相较于常规基于平面参数模型测得的坐标误差有一定程度改善;12~18号待测点所处区域激光面形变较为明显,所研究方法可将坐标测量误差减少约50%。

5 结 论

室内空间测量定位系统以线结构激光面作为传感载体进行空间交会测量,分析了大尺度空间下实际激光面与理想平面模型间偏差对系统测量精度的影响,进而研究了一种发射站激光面非参数模型标定方法,此方法克服了激光面变形复杂、参数模型难以精确拟合的困难,借助高精度转台提供的二维精密角度基准构建了光面旋转时间-空间角度的精密映射关系。基于新的非参数模型标定结果,优化了系统空间交会测量模型,将其所得的三维坐标与常规平面交会模型测得结果对比,发现其在激光面变形较为明显的区域误差减小效果更好。后续研究可以根据待测任务需求,结合不同的参数与非参数模型标定效果,建立组合优化内参模型,并提升解算效率。

参 考 文 献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] Liu L, Ma G Q, Gao Y, et al. Flexible measurement technology of complex curved surface three-dimensional shape robot based on iGPS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0304006.
刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0304006.
- [3] Zhao J G, Huang N, Liu Z, et al. Study and application on technology of navigation for AGV based on iGPS [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(20): 40-44.
- [4] Norman A R, Schönberg A, Gorlach I A, et al. Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64: 427-446.
- [5] Schmitt R, Nisch S, Schönberg A, et al. Performance evaluation of iGPS for industrial applications[C] // 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, September 15-17, 2010, Zürich, Switzerland. New York: IEEE Press, 1-8.
- [6] Shi S D, Yang L H, Lin J R, et al. Omnidirectional angle constraint based dynamic six-degree-of-freedom measurement for spacecraft rendezvous and docking simulation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045005.
- [7] Muelaner J E, Wang Z, Jamshidi J, et al. Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT) [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(3): 217-229.
- [8] Lin J R, Chen J Q, Yang L H, et al. Design and development of a ceiling-mounted workshop measurement positioning system for large-scale metrology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105814.
- [9] Wang Z, Mastrogiacomo L, Franceschini F, et al. Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56: 205-213.
- [10] Zhang Z Y, Ren Y J, Yang L H, et al. A novel rotation speed uniformity evaluation method for the

- rotary laser scanning measurement systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(3): 035023.
- [11] Liu Z, Zhang G J, Wei Z Z, et al. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3124-3128.
刘震, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3124-3128.
- [12] Muelaner J E, Wang Z, Martin O, et al. Verification of the indoor GPS system, by comparison with calibrated coordinates and by angular reference[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23: 2323-2331.
- [13] Huang Z, Zhu J G, Yang L H, et al. Accurate 3-D position and orientation method for indoor mobile robot navigation based on photoelectric scanning[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2015, 64(9): 2518-2529.
- [14] Javier A. *Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation*[M]//Driggers R G. *Encyclopedia of optical engineering*. New York: Marcel Dekker Inc, 2003: 999-1013.
- [15] Serkan M, Kirkici H. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 230-241.
- [16] Lin J R, Xu X, Ren Y J, et al. Model optimization of scanning laser surface for workshop measurement positioning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0315002.
林嘉睿, 徐鑫, 任永杰, 等. 室内空间测量定位系统扫描激光面模型优化[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0315002.
- [17] Xie H, Li W L, Zhu D, et al. A systematic model of machining error reduction in robotic grinding [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(6): 2961-2972.
- [18] Li K Q, Zhu D, Tong X X. Digital speckle correlation method based on improved curved surface fitting method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051001.
李凯强, 朱丹, 佟新鑫. 基于改进曲面拟合法的数字散斑相关方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051001.
- [19] Wang F, Wang G H, Liu W T. A method of edge image detection based on higher order surface fitting [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2009, 29(3): 276-278.
王峰, 王光华, 刘文涛. 一种基于高阶曲面拟合的图像边缘检测方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(3): 276-278.
- [20] Wang W, Zhu J G, Lin J R. Calibration of a stereoscopic system without traditional distortion models [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 093104.
- [21] Wu J, Xu J, Li Y L, et al. Internal calibration method of linear array CCD using nonparametric model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041507.
吴军, 徐鋈, 李雁玲, 等. 采用非参模型的线阵 CCD 内参校准方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041507.