

基于无衍射探针的空间坐标测量及其不确定度分析

马国鹭 曾国英

西南科技大学制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010

摘要 针对长跨度大尺度零部件空间坐标的精确测量过程中,常因空间阻隔、遮挡、被测点凹陷等因素导致隐藏特征区难以甚至无法直接进行光学测量的问题;将具有定心精度高、无离焦、无畸变和抗背景干扰能力强等特性的无衍射光,引入到探针法姿态测量系统中,提出了一种能与全站仪构成组合测量系统的无衍射光测量探针;建立了空间坐标测量系统的模型,研制了测量样机,分析了空间位置测量的不确定度,并进行了相关的对比测量实验;结果表明,基于无衍射光姿态测量探针具有1 mrad的空间姿态测量精度,与全站仪构成组合测量系统在大尺度空间坐标的测量中具有毫米级的测量精度和良好的柔性。

关键字 测量; 探针; 无衍射光; 姿态测量; 空间坐标; 大尺度

中图分类号 TP394.1;TH691.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0512005

Research and Uncertainty Analysis of Probe Based on Non-Diffracting Beam for Measuring Coordinates

Ma Guolu Zeng Guoying

School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract The probe technique based on non-diffracting beam is proposed to be combined with a total station or a laser tracker to form a combined measuring system, which realizes the coordinate measurement of hidden parts in large spaces, in large-span measurement environments, space barrier, blocking. Depression of the measured point and other factors make it impossible to optically and directly measure some areas of the measured article. A attitude measurement probe prototype based on non-diffracting beam technology is developed for a system combined with a total station applied in coordinates precision measurement of hidden areas in large-scale space, the uncertainty of spatial location measurement is analyzed, and the measurement comparison experiment is completed. Experimental results and analysis indicate that the precision of probe's attitude-measuring system and combing measurement system are 1 mrad and ± 1 mm, respectively, demonstrating more flexibility and reliable precision during combined measurement.

Key words measurement; probe; non-diffracting; attitude measurement; space coordinates; large-scale space

OCIS codes 120.4640;120.4820;120.3940;140.3460

1 引言

在现代大型装备(诸如飞机、盾构机、船舶等)的装配定位、质量检测和安全监测等制造工艺过程中^[1-3],对尺度范围从几米至上百米空间内的坐标精确测量非常必要。尽管当前空间坐标测量设备种类繁多,然而在大尺度范围(几十米至百米),针对大尺度构件关键部件的空间坐标测量存在诸多难题^[4-5]。相对常规尺寸(毫米至米)的空间坐标测量而言,由于大尺度范围内的测量存在空间跨度大、环境布局复杂和环境干扰等特点^[6]。因此,大尺度空间中的空间坐标测量设备系统不仅需要保证可靠的测量精度,还需具有环境适应性、使用便携性和操作高效性等。

收稿日期: 2014-11-07; 收到修改稿日期: 2015-01-17

基金项目: 四川省教育厅重点项目(15ZA0116)、西南科技大学自然科学基金(14zx7160)

作者简介: 马国鹭(1981—),男,博士,讲师,主要从事光电精密检测等方面的研究。E-mail: maguolu999@163.com

目前,全站仪和激光跟踪仪被广泛应用在大尺度物件的空间坐标测量。但是,由于空间阻隔、被测点凹陷等因素,导致靶镜无法触及被测点,使得物件上的隐藏区间的坐标无法测量或者需要移站方可测量^[7-11]。然而,某些情况下(例如空间狭窄)移站不被允许。即便可以移站,也会因此给坐标测量带来累积误差^[12-13]。

本文将具有定心精度高、无离焦、无畸变和抗背景干扰能力强等特性的无衍射光,引入到探针法姿态测量系统中去,提出了一种基于无衍射光技术的测量探针,与全站仪构成组合测量系统,以实现大尺度空间中隐藏区域的坐标测量。

2 测量原理

2.1 无衍射光探针组合测量系统原理

全站仪与探针构成的组合测量系统主要包含四个部分,分别是全站仪、探针、便携式计算机和软件,如图1所示。其中 $oxyz$ 为笛卡尔参考坐标系, $ox_1y_1z_1$ 为空间坐标测量仪(全站仪)的局部坐标系, $o'x'y'z'$ 为无衍射光探针的局部坐标系, $o'x_1y_1z_1$ 为 $o'x'y'z'$ 坐标系的辅助参考坐标, P 点代表的是探针的探测头,全站仪和无衍射探针通过电缆与便携式计算机连接并进行数据传输。

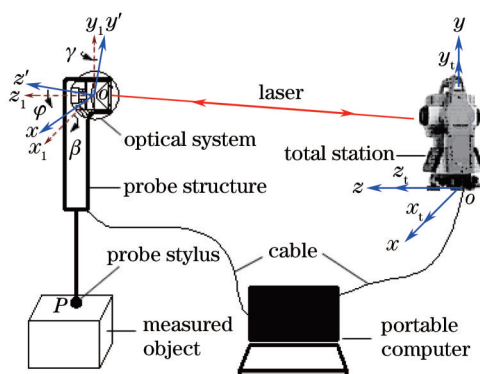


图1 无衍射测量探针与全站仪构成的空间坐标组合测量系统

Fig.1 System for measuring spatial coordinates is combined total station with probe non-diffracting

在测量过程中,将探针的测头接触于被测点,全站仪以自动跟踪模式对准探针的光学系统,测得探针光学系统在全站仪坐标系下的坐标,同时探针测得其自身的空间姿态角,根据坐标变换理论,便可计算得出 P 点的空间坐标。其坐标变换理论为

$$(x_p, y_p, z_p, 1) = (x'_p, y'_p, z'_p, 1) \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_o & y_o & z_o & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中 φ 、 β 与 γ 分别对应探针坐标系 $o'x'y'z'$ 在参考辅助坐标系 $o'x_1y_1z_1$ 下的滚动角、俯仰角与水平方位角; (x_o, y_o, z_o) 是探针坐标系 $o'x'y'z'$ 的原点 o' 在参考坐标系 $oxyz$ 中的空间位置, (x'_p, y'_p, z'_p) 为无衍射光探针测头 P 点在探针自身坐标系 $o'x'y'z'$ 中的相对坐标,由于探针是刚体结构测头 P 点在其坐标系 $o'x'y'z'$ 下的位置关系是一确定值,可通过标定测量获得。

全站仪瞄准无衍射探针中的立方反射棱镜测量出探针参考点在 o' 在全站仪坐标中的空间位置:

$$\begin{cases} x_i = x_j + S \cdot \cos \beta_i \\ y_i = y_j + S \cdot \cos \gamma_i \cdot \sin \beta_i \\ z_i = z_j + S \cdot \sin \gamma_i \cdot \sin \beta_i \end{cases} \quad (2)$$

式中 (x_j, y_j, z_j) 为全站仪的坐标原点在地球坐标系中的位置坐标, S 、 β_i 和 γ_i 分别对应为全站仪测量无衍射探针中的立方反射棱镜的顶点在全站仪坐标系 $ox_1y_1z_1$ 下的斜距、俯仰角与水平方位角。将(1)式代入(2)式,探针测头

P 在全局坐标系中的空间位置坐标如下:

$$\begin{cases} x_p = x_j + S \cdot \cos \beta_i + x'_p \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma + y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - \\ z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \gamma - z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma \\ y_p = y_j + S \cdot \cos \gamma_i \cdot \sin \beta_i + x'_p \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma + y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - \\ z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma + z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \\ z_p = z_j + S \cdot \sin \gamma_i \cdot \sin \beta_i + x'_p \cdot \cos \beta - y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

2.2 无衍射测量探针的姿态测量原理

探针主要由二维图像传感器 CCD、Axicon 透镜、反射器和测角精度为 1 mrad 的二维电子倾角仪构成,其结构如图 2 所示,其中 $oxyz$ 代表的全站仪的坐标系。其中反射器是将直角棱镜的顶点切割成一个与底面平行的小平面;当全站仪对准探针光学系统发出一束测距激光,反射器将大部分激光反射给全站仪用于测距;而透射过反射器的激光,经由 Axicon 透镜生成无衍射光图像,被图像传感器 CCD 接收,与二维电子倾角仪的示数一并通过电缆将数据传输给计算机的软件处理系统。

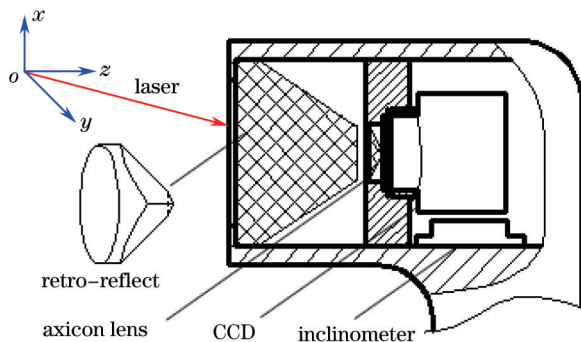


图 2 无衍射探针的系统结构

Fig.2 System structure of the probe based on non-diffracting beam

由于全站仪瞄准立方反射棱镜时测量的是立方角锥棱镜顶点在全站仪坐标系 $ox_1y_1z_1$ 中的坐标,故此探针坐标系 $o'x'y'z'$ 的原点 o' 建立在立方反射棱镜的顶点,而轴 $o'z'$ 垂直于图像传感器 CCD 的光敏面,如图 3 所示。

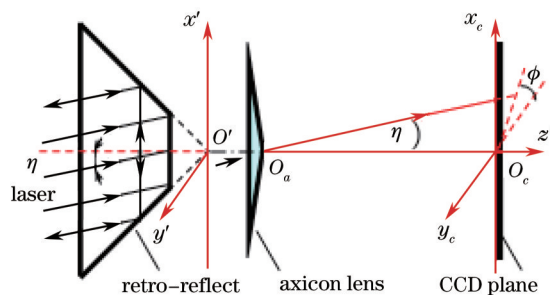


图 3 探针中基于无衍射光的入射角测量

Fig.3 Measurement of incident angle based non-diffracting in probe

全站仪所发出的测距激光束在探针光学坐标中的入射角为 η 与无衍射光斑中心在 CCD 上的位置一一对应,如下式所示:

$$\begin{cases} x_c = z_{ac} \tan \eta \sin \phi \\ y_c = z_{ac} \tan \eta \cos \phi \end{cases} \quad (4)$$

式中 z_{ac} 为 Axicon 的锥点 o_a 到平面 $x_c o_c y_c$ 坐标原点 o_c 的距离, ϕ 为无衍射光斑中心在图像传感器 CCD 光敏面 $x_c o_c y_c$ 平面中的位置夹角。

而无衍射光束在 CCD 光敏面上的光强分布可描述为

$$\begin{aligned} I(x_c, y_c) &= J_0^2 [k(n-1)\eta(\rho_c - h_c)] = \\ &= J_0^2 [k(n-1)\eta(\rho_c - z_{ac} \tan \eta)] = \\ &= J_0^2 [k(n-1)\eta \sqrt{(x_c - z_{ac} \tan \eta \sin \phi)^2 + (y_c - z_{ac} \tan \eta \cos \phi)^2}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中 J_0 为第一类零阶贝塞尔函数, k 为波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 为照射激光束的波长, n 为 Axicon 材料的折射率, θ 为 Axicon 锥面与底面之间的夹角, (x_c, y_c) 为 CCD 光敏面平面坐标 x_c, y_c 中位置坐标, (x_{cn}, y_{cn}) 为无衍射光斑中心在坐标系 x_c, y_c 中的位置坐标, $\rho=(x_c^2+y_c^2)^{1/2}$, $h_c=(x_{cn}^2+y_{cn}^2)^{1/2}$ 。

无衍射测量探针中的二维电子倾角仪、光学系统与全站仪之间在 $oxyz$ 参考坐标系中的空间相对位置关系如图 4 所示。 $o_i x_i y_i z_i$ 是二维电子倾角仪的坐标系, $o_1 x_1 y_1 z_1$ 是辅助坐标系并与 $oxyz$ 坐标系成空间平移的位置关系, $abcd$ 为其辅助平面, $o'b$ 和 $o'c$ 分别为探针坐标系 $o'z'$ 与照射光束 oo' 在平面 $y_1 o' z_1$ 上的投影。

根据空间几何关系, 二维电子倾角仪的示数: 滚动角 φ_i 和俯仰角 β_i 与无衍射光探针在参考坐标系 $oxyz$ 中的滚动角 φ 与俯仰角 β 之间的关系为

$$(\cos \varphi_i)^2 = (\cos \varphi)^2 + (\sin \varphi \times \sin \beta_i)^2 \quad (6)$$

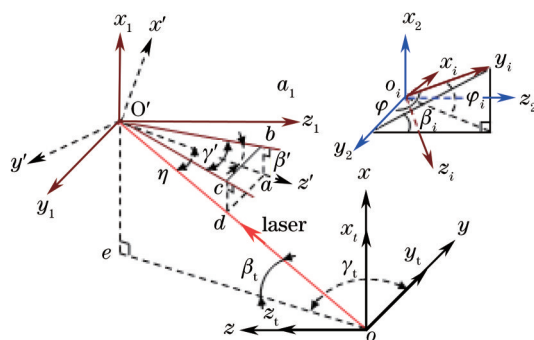


图 4 无衍射探针的姿态角空间几何关系

Fig.4 Spatial geometric relationship of probe's attitudes angle in space

无衍射光测量探针的空间姿态测量角与全站仪的示数之间的关系为

$$\begin{cases} \beta = \beta_i \\ \gamma = \gamma_i + \gamma' \\ \varphi = \arcsin(\sin \varphi_i / \cos \beta_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中 φ_i 与 β_i 是二维电子倾角仪测得的关于轴 $o_i x_i$ 与 $o_i y_i$ 的旋转角。 β_i 与 γ_i 是全站仪瞄准无衍射测量探针中直角锥棱镜所测得的俯仰角与水平方位角, 也即是坐标原点 o' 在全站仪坐标系 $o_1 x_1 y_1 z_1$ 中的空间位置, 其中 γ' 为 $o'z'$ 与 oo' 在平面 $y_1 o' z_1$ 上的投影线 $o'b$ 与 $o'c$ 的空间夹角, 其对应关系为

$$\gamma' = \arctan \frac{\sin \eta \cdot \cos(\phi + \varphi)}{\cos \eta \cdot \cos \beta - \sin \eta \cdot \sin(\phi + \varphi) \cdot \sin \beta} \quad (8)$$

在组合测量过程中, 全站仪的测量读数, 二维电子倾角仪的读数与二维图形传感器所捕获的无衍射光束通过数据线传送到计算机处理系统中去。其根据无衍射光束的定中算法^[14-17]计算得出光斑在二维图形传感器 CCD 上的位置坐标, 一一与探针光轴 $o'z'$ 的空间夹角 η 映射。将各测量的相应读数代入(7)式与(8)式, 便可计算得出无衍射测量探针的空间姿态角 (φ, β, γ) 。

3 组合坐标测量系统的不确定度分析

根据国际 ISO1993 年刊印, 1995 年修正的不确定度的分析理论^[17-19], 标准不确定度计算的方差方程为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (9)$$

式中 y , x_i 分别为直接和间接测量的量, 且 y 是变量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的函数 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $u(x_i)$ 是变量 x_i 的 A 类或 B 类不确定度。

将(7)、(8)式代入(9)式便可得出无衍射测量探针的姿态不确定度为

$$\begin{cases} u_c(\beta) = u_c(\beta_i) \\ u_c(\gamma) = [u_c^2(\gamma_i) + u_c^2(\gamma')]^{1/2} \\ u_c(\varphi) = \left[\frac{(\cos \varphi_i)^2}{(\cos \beta_i)^2 - (\sin \varphi_i)^2} \cdot u_c^2(\varphi_i) + \frac{(\sin \varphi_i)^2 \cdot (\cot \beta_i)^2}{[(\cos \beta_i)^2 - (\sin \varphi_i)^2] \cdot (\sin \beta_i)^2} \cdot u_c^2(\beta_i) \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (10)$$

式中 $u_c(\gamma')$ 为

$$\begin{aligned} u_c(\gamma') = & \frac{1}{[\cos \eta \cdot \cos \beta - \sin \eta \cdot \sin(\phi + \varphi) \cdot \sin \beta]^2 + [\sin \eta \cdot \cos(\phi + \varphi)]^2} \\ & \left\{ [\cos(\phi + \varphi) \cdot \cos \beta]^2 \cdot u_c^2(\eta) + \right. \\ & [\sin^2 \eta \cdot \sin^2 \beta - \sin \eta \cdot \cos \eta \cdot \sin(\phi + \varphi) \cdot \cos \beta]^2 \cdot u_c^2(\phi) + \\ & [\sin^2 \eta \cdot \sin^2 \beta - \sin \eta \cdot \cos \eta \cdot \sin(\phi + \varphi) \cdot \cos \beta]^2 \cdot u_c^2(\varphi) + \\ & \left. [\sin \eta \cdot \cos(\phi + \varphi) \cdot [\cos \eta \cdot \sin \beta + \sin \eta \cdot \sin(\phi + \varphi) \cdot \cos \beta]]^2 \cdot u_c^2(\beta) \right\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 u_c 表示标准不确定度,相应地, $u_c(\beta)$, $u_c(\gamma)$, $u_c(\varphi)$ 和 $u_c(\gamma')$ 分别对应的是无衍射测量探针的姿态角度 β , γ , ϕ 的标准不确定度;类似地, $u_c(\beta_i)$, $u_c(\varphi_i)$, $u_c(\eta)$, $u_c(\phi)$ 和 $u_c(\gamma_i)$ 也分别对应直接测量的量 β_i , φ_i , η , ϕ 与 γ_i 的 A 类或 B 类不确定度。

类似地,无衍射光束与全站仪所构成的组合测量系统的空间坐标测量不确定度为。

$$\begin{aligned} u_c(x_p) = & \left[\cos^2 \beta_i \cdot u_c^2(S) + S^2 \cdot \sin^2 \beta_i \cdot u_c^2(\beta_i) + \right. \\ & (y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - x'_p \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma)^2 \cdot u_c^2(\beta) + \\ & (z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - x'_p \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma - y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - \\ & y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma - z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma)^2 \cdot u_c^2(\gamma) + (y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \\ & z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma - z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \gamma)^2 \cdot u_c^2(\varphi) \left. \right]^{1/2}, \\ u_c(y_p) = & \left[\cos^2 \gamma_i \cdot \sin^2 \beta_i \cdot u_c^2(S) + S^2 \cdot \sin^2 \gamma_i \cdot \sin^2 \beta_i \cdot u_c^2(\gamma_i) + S^2 \cdot \cos^2 \gamma_i \cdot \cos^2 \beta_i \cdot u_c^2(\beta_i) + \right. \\ & (y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma - x'_p \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma)^2 \cdot u_c^2(\beta) + \\ & (x'_p \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma + y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - \\ & y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \gamma - z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma)^2 \cdot u_c^2(\gamma) + (y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \\ & z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma + z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma)^2 \cdot u_c^2(\varphi) \left. \right]^{1/2}, \\ u_c(z_p) = & \left[\sin^2 \gamma_i \cdot \sin^2 \beta_i \cdot u_c^2(S) + S^2 \cdot \cos^2 \gamma_i \cdot \sin^2 \beta_i \cdot u_c^2(\gamma_i) + S^2 \cdot \sin^2 \gamma_i \cdot \cos^2 \beta_i \cdot u_c^2(\beta_i) + \right. \\ & (y'_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta - x'_p \cdot \sin \beta)^2 \cdot u_c^2(\beta) + (z'_p \cdot \cos \varphi \cdot \sin \gamma)^2 \cdot u_c^2(\gamma) + \\ & \left. (y'_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta + z'_p \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma)^2 \cdot u_c^2(\varphi) \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (12)$$

由于文中采用的是 Leica 公司 TPS1202⁺型全站仪,其斜距精度为 $(\pm 1 + 10^{-6})$ mm,俯仰角与水平方位角的测量精度均为 $2''$,其误差分布均服从正态分布,在因子 3 下其 B 类标准不确定度 $u_c(S) < 1$ mm、 $u_c(\beta_i) = u_c(\gamma_i) = 3.23 \times 10^{-3}$ mrad;电子倾角仪采用的陕西日成科技公司 LE-30 型二维电子倾角仪,其测量范围为 $\pm 30^\circ$,测角绝对精度为 0.01° ,相应地,在因子 3 下其 B 类标准不确定度为 $u_c(\varphi_i) = u_c(\beta_i) = 0.0582$ mrad;由于 (x_j, y_j, z_j) 是全站仪在地球坐标系中的位置坐标,其值是通过大地坐标测量的方式多次测量的位置均值并被作为参考基准位置点,其位置偏差可忽略,故此其对应的不确定度可近似为 $u_c(x_j) = u_c(y_j) = u_c(z_j) = 0$ 。依据该无衍射探针空间姿态测量的设计范围,其滚动角、水平俯仰角与方位角均在 $\pm 15^\circ$,斜距 S 不大于 20 m 的锥形区域内,将相应的参数代入(10)~(12)式后计算得出系统的不确定度为 $u_c(x_p) = u_c(y_p) \approx 1.25$ mm, $u_c(z_p) \approx 1.5$ mm。

4 实验验证

4.1 无衍射测量探针姿态测量实验

在组合测量中,姿态角的测量精度直接影响到整体系统的测量精度。探针系统的滚动角选用精度达毫弧度的陕西日成科技公司 LE-30 型电子倾角仪。为验证探针的其他两个姿态角的测量精度,使用测角精度为 1" 的经纬仪,构建俯仰角和水平精度测量的实验平台,如图 5 所示。探针的光学系统置于 $o'_s x'_s y'_s z'_s$ 调整平台上,光学系统可随支撑平台沿导轨移在 $o'_s y'_s$ 与 $o'_s z'_s$ 轴移动调节。

在测试实验中,将经纬仪调平后对准探针的光学系统,并记录经纬仪的水平角和俯仰角的读数,再通过捕获的无衍射光图像进行处理,结合实验标定数据^[20],计算得出探针系统的水平角和俯仰角。沿 $o'_s y'_s$ 轴和 $o'_s z'_s$ 轴调整光学系统的空间位置,绕 $o_s z_s$ 与 $o_s y_s$ 轴旋转经纬仪的镜头对准探针的光学系统,测得水平方位角和俯仰角,重复上述步骤,获得多组实验数据。在实验验证过程中为了确保坐标系 $o'_s x'_s y'_s z'_s$ 与 $o_s x_s y_s z_s$ 始终保持确定的位置关系(即在沿导轨平移前后的坐标系仅为空间平动),因此在每次的移动过程中将全站仪调整至水平以确保 $o_s z_s$ 平行于竖直方向。将探针光学系统与经纬仪测得的角度值求差,其误差曲线如图 6 所示。统计实验误差数据表明,探针姿态角测量精度小于 ± 0.5 mrad。

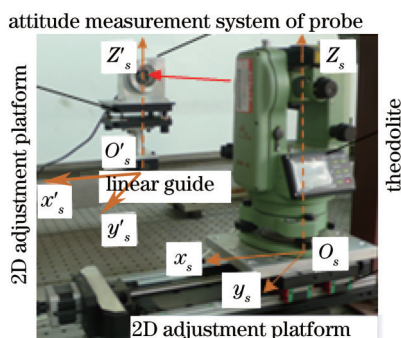


图 5 无衍射测量探针姿态测量验证实验

Fig.5 Diagram of the experimental setup measuring the attitude angles

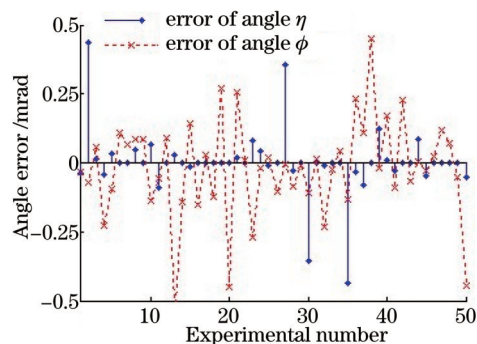


图 6 姿态角测量误差曲线

Fig.6 Curve of angle error

4.2 组合测量对比验证实验

无衍射探针与测角精度在 2"、测距精度为 (1 ± 10^{-6}) mm 的 Leica 的 TPS1202⁺ 型全站仪构成组合测量系统。为了验证组合系统的空间坐标测量精度,以全站仪和组合系统两种测量方式,对同一空间点进行空间坐标测量,通过测量对比来验证组合系统的测量精度,其实验方式如图 7 所示。

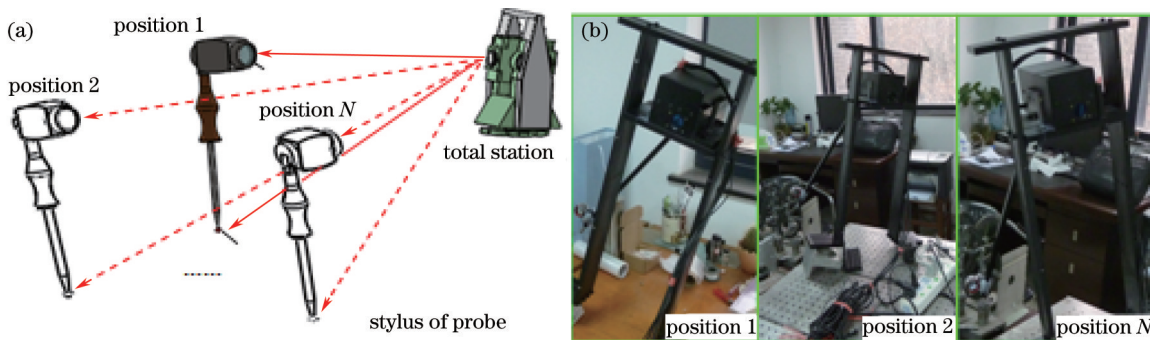


图 7 直接与间接测量对比实验。(a) 实验原理; (b) 搭建的实验平台

Fig.7 Diagram of the working principle of the combined measurement experiment. (a) Experimental principle; (b) experimental platform

在探针测头处安装一个角锥棱镜;采用全站仪瞄准探针的光学系统进行测量,计算出探针测头在全站仪坐标系下的空间坐标;再将全站仪直接瞄准探针测头上的角锥棱镜测得其空间位置坐标;然后改变探针空间位置和姿态并重复以上步骤,进行多次测量并记录;最后对比间接测量与直接测量的坐标位置数据,如表 1 所示。

表 1 探针处于不同的空间位姿下,通过全站仪和组合系统各自测量的空间坐标

Table 1 Coordinates of probe stylus in different positions

Combined measurement		Measured by total station	Error
$(x_p, y_p, z_p) / \text{mm}$	Angle $(\gamma, \beta, \varphi) / \text{rad}$	$(x_s, y_s, z_s) / \text{mm}$	$(\Delta x, \Delta y, \Delta z) / \text{mm}$
(-11644.6,65136.6,-426.5)	(0.0582,0.1274,0.021)	(-11644.0,65137.5,-426.3)	(-0.6,-0.9,-0.2)
(-11641.9,61509.6,-425.9)	(-0.0701,0.0932,-0.0171)	(-11641.1,61510.8,-426.2)	(-0.8,-1.2,0.3)
(-12007.0,65092.5,-433.5)	(0.0237,-0.0521,-0.0179)	(-12007.3,65093.3,-432.4)	(0.3,-0.8,-1.1)
(-11036.6,65053.0,-435.3)	(-0.0492,0.0214,0.0591)	(-11036.5,65054.8,-433.9)	(-0.1,-1.8,-1.4)
(-11660.9,65126.3,-428.7)	(0.1021,-0.1521,0.013)	(-11661.1,65126.4,-428.1)	(0.2,-0.1,-0.6)
(-11934.3,65065.7,-373.6)	(-0.0956,0.1402,-0.0815)	(-11934.5,65066.4,-372.6)	(0.2,-0.7,-1.0)
(-11808.5,65281.3,-428.5)	(0.1002,0.1102,-0.2251)	(-11807.9,65281.7,-427.8)	(-0.6,-0.4,-0.7)
(-11123.6,65132.7,-313.0)	(-0.0803,-0.0973,-0.0401)	(-11123.3,65133.3,-313.5)	(-0.3,-0.6,0.5)
(-11036.6,65053.0,-435.3)	(-0.0372,0.0628,0.2138)	(-11036.2,65054.1,-434.5)	(-0.4,-1.1,-0.8)
(-11205.1,64566.2,-427.8)	(-0.0152,0.0231,-0.0132)	(-11204.4,64567.4,-427.6)	(-0.7,-1.2,-0.2)
(-11017.9,65056.8,-425.6)	(0.0721,-0.0830,-0.1981)	(-11016.5,65056.0,-425.5)	(-1.4,0.8,-0.1)

探针在前后 4 m、左右 1.5 m 的空间内移动,姿态角的改变范围为:滚动角 $\pm 15^\circ$ 、俯仰角与水平方位角在 $\pm 8^\circ$;探针间接与全站仪直接对测头的空间位置坐标进行测量,并进行对比;实验数据表明通过探针间接测量与全站仪直接测量的位置坐标的偏差量小于 ± 1.5 mm,证明探针在跨度大的空间中进行位置坐标测量可行且可靠。

5 结 论

将无衍射光引入到探针姿态角的测量系统中,利用无衍射光的特性,大大降低了背景噪声的影响,消除了测角分辨率和精度对探针反射器切口平面的作用,使得探针的水平角和俯仰角的测量精度具有毫弧度级,确保了在组合测量中的空间坐标的测量精度。该探针不仅可以与全站仪组合,还可与激光跟踪仪或者其他具有发射平行激光装置的设备构成组合测量系统,例如经纬仪、测距仪等。这一空间姿态测角技术,也可实用于大尺度范围中的姿态测量。

参 考 文 献

- 1 Tan Jiubin, Li Dongsheng. Some research developments of key-technology in super precision instruments engineering[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2003, 14(2): 83-88.
谭久彬,李东升.超精密仪器工程关键技术研究若干进展[J].中国计量学院学报,2003,14(2):83-88.
- 2 Wang Daodang, Wang Fumin, Chen Xixi, *et al.*. Three-dimensional coordinate measurement with point-diffraction interferometer based on Levenbery-Marquardt algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812001.
王道档,王福民,陈茜茜,等.基于Levenbery-Marquardt算法的点衍射三维坐标测量方法[J].光学学报,2014,34(8):0812001.
- 3 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
张旭苹,汪家其,张益昕,等.大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J].光学学报,2012,32(3):0315002.
- 4 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Ren Xing, *et al.*. Optimal layout of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0708001.
胡进忠,余晓芬,任兴,等.基于激光多边法的坐标测量系统最佳布局[J].中国激光,2014,41(7):0708001.
- 5 Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Development of a laser-based geometric measurement system for large-scale conical[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508008.
周森,郭永彩,高潮.基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J].中国激光,2014,41(5):0508008.
- 6 Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.*. Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.
彭石军,苗二龙,史振广,等.高精度曲率半径测量研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(1):011201.
- 7 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J].

- Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.
- 晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- 8 Cuypers W, Van Gestel N, Voet A, *et al.*. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology[J]. *Opt&Lasers in Eng*, 2009, 34(3-4): 292-300.
- 9 Masuzawa T, Kim B J. Twin-probe vibroscanning method for dimensional measurement of microholes[J]. *Annals of CIRP*, 1997, 46(1): 437-440.
- 10 Dich L Z, Latyev SM. Status of research and development in coordinate measurement technology[J]. *J Opt Technol*, 1994, 61(9): 636-640.
- 11 Erkrit L, Nobuyuki A, Masahiro Y. Analysis of measurement accuracy of quadrilateral hole using optical inner-diameter-measuring machine[J]. *Opt Eng*, 2003, 42(9): 2568-2575.
- 12 Fedorov V G. Six-axis coordinates measuring machines[J]. *Measurement Techniques*, 2008, 51(7): 724-725.
- 13 Lu R S, Li Y F. A global calibration method for large-scale multi-sensor visual measurement systems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 116(3): 384-393.
- 14 Guolu Ma, Bin Zhao. Polar transformation-based phase-scanning method for centering a non-diffracting fringe image[J]. *Opt Commun*, 2014, 325: 47-53.
- 15 Chen Hui, Zhao Bin. Global center detection algorithm of non-diffracting spot[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5):770-773.
陈 慧, 赵 斌. 无衍射光斑整体中心检测算法[J]. *半导体光电*, 2008, 29(5): 770-773.
- 16 Bi Xiaowei, Zhu Limin, Zhao Bin. A center detection algorithm of non-diffracting beam based on ring filtering[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(1): 106-110.
毕小伟, 朱利民, 赵 斌. 基于圆环滤波的无衍射光定中算法[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(1):106-110.
- 17 Veronika, R.Meyer. Measurement uncertainty[J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, 1158(1): 15-24.
- 18 Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512001.
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512001.
- 19 Wang Yang, Yan Changxiang, Zhang Da, *et al.*. Error analysis for the non-contact measuring system of pointing mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1012001.
王 洋, 颜昌翔, 张 达, 等. 非接触式指向反射镜检测系统的误差分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1012001.
- 20 Chen Hui, Zhao Bin, Ma Guolu. Study on direct mapping calibration method of an electronic target based on non-diffracting beam[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 407-411.
陈 慧, 赵 斌, 马国鹭. 无衍射光电子标靶的直接映射标定方法研究[J]. *激光技术*, 2011, 35(3): 407-411.

栏目编辑: 何卓铭