

# 旋转激光扫描无源多靶点定位方法

朱博源<sup>1</sup>, 任永杰<sup>1\*</sup>, 段显龙<sup>2</sup>, 周海峰<sup>2</sup>, 王政超<sup>3</sup>, 申文杰<sup>1</sup>, 林嘉睿<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

<sup>2</sup>中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东 广州 510715;

<sup>3</sup>大连船舶重工集团有限公司, 辽宁 大连 116000

**摘要** 由于旋转激光扫描测量系统采用的是有源式收发分体的仪器架构, 因此其易受到工业现场复杂测量条件的制约。针对系统现场适应性受限的问题, 提出了一种基于旋转激光扫描的单站式无源多靶点定位方法。在所提方法中, 将多个角锥棱镜作为无源待测靶点。通过构建非球面反射接收模型实现了信号发射端与接收端的结合, 并分析比较了该测量模式下的信号延时。此外, 建立了多靶点光信号匹配机制以实现无源多靶点交会定位。最后, 在工作空间测量定位系统平台上进行了实验验证。结果表明, 所提方法在 10 m 测量范围内的三个方向上均能实现亚毫米级的定位精度, 有效提高了旋转激光扫描测量系统在复杂测量环境中的适应性。

**关键词** 测量; 旋转激光扫描测量系统; 非球面反射; 信号延时分析; 光信号匹配; 无源多靶点定位

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0512001

## Passive Multi-Target Location Method Based on Rotating Laser Scanning

Zhu Boyuan<sup>1</sup>, Ren Yongjie<sup>1\*</sup>, Duan Xianlong<sup>2</sup>, Zhou Haifeng<sup>2</sup>,  
Wang Zhengchao<sup>3</sup>, Shen Wenjie<sup>1</sup>, Lin Jiarui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Company Limited, Guangzhou, Guangdong 510715, China;

<sup>3</sup>Dalian Shipbuilding Industry Co., Ltd, Dalian, Liaoning 116000, China

**Abstract** Because the rotating laser scanning measurement system adopts the instrument structure of separate receiver and transmitter, it is easy to be restricted by the complex measurement conditions in the industrial field. Aiming at the problem of limited adaptability of the system in the field, a single-station passive multi-target location method based on rotating laser scanning is proposed. In the proposed method, multiple cube-corner prisms are introduced as passive targets to be measured. The combination of signal transmitter and receiver is realized by constructing aspheric reflection receiving model, and the signal delay in this measurement mode is analyzed and compared. Moreover, a multi-target optical signal matching mechanism is established to realize passive multi-target rendezvous location. Finally, the experimental verification is carried out on the platform of workshop Measurement Positioning System. The results show that the proposed method can achieve sub-millimeter positioning accuracy in three directions within 10 m measurement range, and effectively improve the adaptability of rotating laser scanning measurement system in complex measurement environment.

**Key words** measurement; rotating laser scanning measurement system; aspheric reflection; signal delay analysis; optical signal matching; passive multi-target location

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-29; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(51775380, 51721003)、天津市自然科学基金(18JCYBJC19400)、H1229 项目(中船黄埔文冲船舶有限公司)

通信作者: \*yongjieren@tju.edu.cn

# 1 引言

近年来,旋转激光扫描测量系统因具有可拓展的分布式网络测量模式、多任务同步测量等特点,在船舶、航空航天等大型装备制造领域中得到了越来越广泛的关注和应用<sup>[1-3]</sup>。该类测量系统通过空间多光束的扫描将角度信息转化为时间序列的相位特征,结合空间角度交会原理,实现了待测目标的空间坐标测量。目前,Nikon 公司生产的 Indoor GPS、天津大学研制的工作空间测量定位系统(wMPS)均是采用该原理研发的定位系统<sup>[4-5]</sup>。

不同于激光跟踪仪、全站仪等直接从测量单元获取测量信息的仪器设备,该类测量系统在拓扑结构上采用信号发射端与接收端分离的仪器架构,将有源接收器作为待测目标并通过线缆连接后续的信号处理器以进行供电及信号传输,即有源收发分体。该种架构的仪器在测量范围和效率上具有明显优势且易于实现分布式组网测量<sup>[6]</sup>。然而,当其被应用于复杂的工业测量现场时容易出现交会光路遮挡、线缆干涉和信号易受干扰等问题。

以基于分段建造工艺的船舶制造过程为例,在移位对接过程中,通过在船舶分段上布置有源接收器的方式实现精确定位<sup>[7]</sup>。有源接收器需要接收多台发射站的光信号以实现空间交会,然而在空间遮挡问题严重的工业现场难以进行多站交会测量。同时,有源接收器与信号处理器间的走线较为混乱,移位时容易造成线缆缠绕,影响工作效率。此外,线缆传输的微弱电信号经常受到待测物体上的强电磁干扰,严重时接收器甚至不能正常工作。这些问题很大程度上限制了系统的性能,因此亟须开展关于待测目标无源化的研究。

针对上述问题,戚祖敏等<sup>[8]</sup>研究了角锥棱镜的光学特性,并探究了将角锥棱镜作为无源回射器时,其在不同情况下的反射效果。Fuhrmann 等<sup>[9]</sup>在干涉合成孔径雷达中将角锥棱镜作为参考目标以测量地表形变。张海峰等<sup>[10]</sup>将角锥棱镜作为合作目标,实现了光信号原路返回,可用于目标飞行器远场时的快速搜索捕获,近场时的精确测量。在大视场光信号接收方面,Hammar 等<sup>[11]</sup>研究了一种离轴三镜反射望远镜接收系统,但是该系统存在光学系统口径较小的问题,故无法实现长距离微弱光信号接收。朱国宜等<sup>[12]</sup>将光锥作为中继元件,提出了一种单元探测器大视场凝视接收光学系统的设计方案,但其

难以被应用于需在高速旋转时传输信号的系统中。

本文将天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研制的 wMPS 作为实验平台展开研究,提出了一种基于旋转激光扫描的单站式无源多靶点定位方法。在该方法中,将角锥棱镜作为待测靶点并将信号发射端与接收端相结合,构建了无源多靶点旋转激光扫描探测平台。针对在高速旋转过程中难以采用线缆、滑环等方式传输微弱信号的问题,借鉴单视点双曲面折反射全景成像系统<sup>[13-14]</sup>,研究了一种单点双曲面反射接收方法以实现回光信号的探测,并在此基础上对该种测量模式的信号延时进行了分析比对<sup>[15]</sup>。同时,基于单站式无源多靶点交会定位,实现了多个无源靶点混叠光信号的匹配。最后,对上述方法进行了实验验证。结果表明,所提定位方法在 10 m 测量范围内的三个方向上能够达到亚毫米级的定位精度,有效提高了旋转激光扫描测量系统的适应性,表明其在复杂工业测量现场应用中具有可行性。

## 2 无源多靶点旋转激光扫描探测平台的构建

在复杂工业现场中,有源收发分体的旋转激光扫描测量系统难以有效发挥自身仪器的性能。本文以 wMPS 为平台展开研究,构建了基于无源靶点的旋转激光扫描探测平台。

### 2.1 多靶点交会定位原理

wMPS 主要由发射站、有源接收器和信号处理器组成。发射站周期性地发射同步脉冲激光和扇形扫描激光,有源接收器将发射站的同步光信号和扫描光信号转换为电信号并经过线缆传输至信号处理器,由信号处理器将信号的时间信息发送给计算机,收到多台发射站的光信号后即可解算出有源接收器的空间坐标<sup>[16]</sup>。然而,在复杂工业现场中存在较为严重的空间遮挡问题,故往往难以进行多站布局。因此,根据视觉测量中的空间后方交会原理<sup>[17-18]</sup>,提出了基于单台发射站的多靶点交会定位方法,如图 1 所示。单台发射站的数学模型描述如下。以发射站转轴为  $Z$  轴,方向竖直向上,扫描光平面 1 与  $Z$  轴的交点为原点  $O$ ,原点指向转台转过后的某一特定位置为  $X$  轴,利用右手坐标系原则定义  $Y$  轴。在初始位置时,扫描光平面 1 的法向量为  $\mathbf{n}_1 = [a_1 \quad b_1 \quad c_1]^T$ ,其截距为  $d_1$ 。扫描光平面 2 的法向量为  $\mathbf{n}_2 = [a_2 \quad b_2 \quad c_2]^T$ ,其截距为  $d_2$ 。在初始位置的光平面可定义为

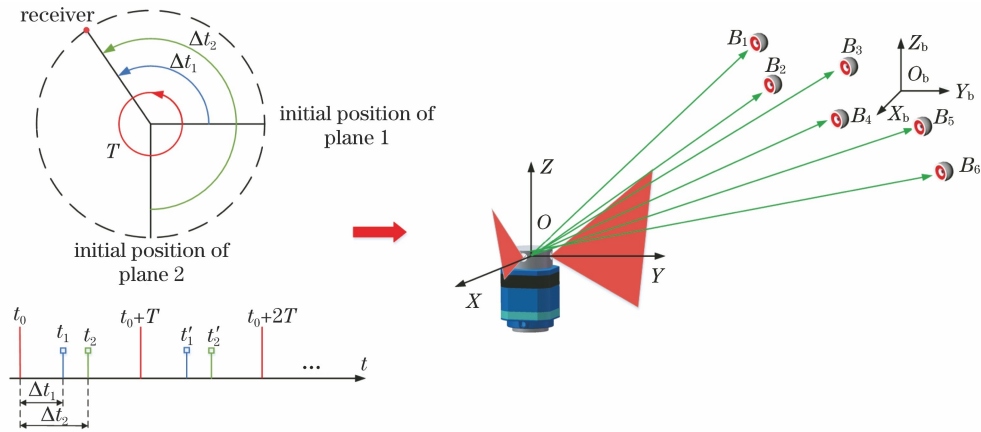


图 1 多靶点交会定位原理

Fig. 1 Principle of multi-target rendezvous positioning

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2$  和  $d_2$  为发射站中提前标定的内部参数。

在单站测量过程中,发射站的旋转周期为  $T$ , 根据有源接收器接收同步光信号时刻  $t_0$  与接收两个扫描光信号时刻 ( $t_1$  和  $t_2$ ) 间的时间差 ( $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ ) 可以计算两个扫描光平面相对预定的初始时刻转过的角度 ( $\theta_1$  和  $\theta_2$ )

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

定义发射站坐标系  $O-XYZ$ , 并将其作为测量坐标系。以待测物体上的指定点为原点建立待测物体坐标系  $O_b-X_bY_bZ_b$ 。有源接收器被作为靶点  $B_i$  固定于待测物体上, 将其在待测物体坐标系下的坐标  $(x_{b,i}, y_{b,i}, z_{b,i})$  作为结构参数, 并对该参数进行提前标定, 其中  $i$  表示靶点的编号。发射站扫描光平面扫到靶点时的约束方程为

$$F = [a_j \quad b_j \quad c_j \quad d_j] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_Z^T(\theta_{ij}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{b,i} \\ y_{b,i} \\ z_{b,i} \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

式中:  $j = 1, 2$  表示发射站中扫描光平面编号;  $a_j, b_j, c_j$  和  $d_j$  表示扫描光平面  $j$  初始位置的方程系数;  $\theta_{ij}$  表示扫描光平面  $j$  由初始位置旋转至靶点  $B_i$  的旋转角度;  $\mathbf{R}_Z^T(\theta_{ij})$  表示旋转矩阵;  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  表示两个坐标系间的旋转和平移关系。若假设靶点  $B_i$  在发射站坐标系  $O-XYZ$  下的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 则两个坐标系间的坐标变换关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_{b,i} \\ y_{b,i} \\ z_{b,i} \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (4)$$

旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$  共有 12 个未知参数, 每个靶点可提供 2 个约束方程, 故不少于 6 个靶点即可求解得到  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ 。同时, 根据(4)式可以得到待测物体的位姿以及待测物体上任意点在发射站坐标系  $O-XYZ$  下的坐标, 进而实现待测物体的空间定位。

## 2.2 基于角锥棱镜的反射接收模型

为了实现待测目标无源化, 对扫描光扫过无源反射器时回射光束的特点进行了研究。同时, 针对高速旋转的转台难以采用线缆、滑环等方式传输微弱信号的问题, 提出了一种单点双曲面反射接收方法以实现回光信号的探测。

角锥棱镜是一种被广泛应用于激光测距、激光扫描和空间精密测量等领域中的高精度光学元件, 从底面入射的光线会从平行于入射光线的反方向射出。中空型的角锥棱镜仅由三个正交反射表面构成, 光线入射或出射至底面时不会产生折射且测量精度较高。本文以中空型角锥棱镜(以下简称棱镜)为研究对象, 光线入射时的轨迹如图 2(a)所示。定义棱镜顶点为坐标原点  $O$ , 直角边长为  $a$ , 三个正交反射面分别位于  $XOY$  平面、 $YOZ$  平面和  $XOZ$  平面, 入射光线  $\mathbf{I}$  与底面的交点为  $D$ , 出射光线  $\mathbf{R}'$  与底面的交点为  $E$ 。

假设入射光线  $\mathbf{I}$  的单位矢量  $\mathbf{I}'$  为  $(-l, -m, -n)$ , 其中  $l, m, n$  均为正数。根据角锥棱镜定向反射的特性, 出射光线  $\mathbf{R}'$  的单位矢量  $\mathbf{R}'_1$  为  $(l, m, n)$ , 即  $-\mathbf{R}'_1 = \mathbf{I}'$ 。设  $\mathbf{I}$  交于底面的点  $D$  的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 根据内部光线轨迹, 可以得到  $\mathbf{R}'$  交于

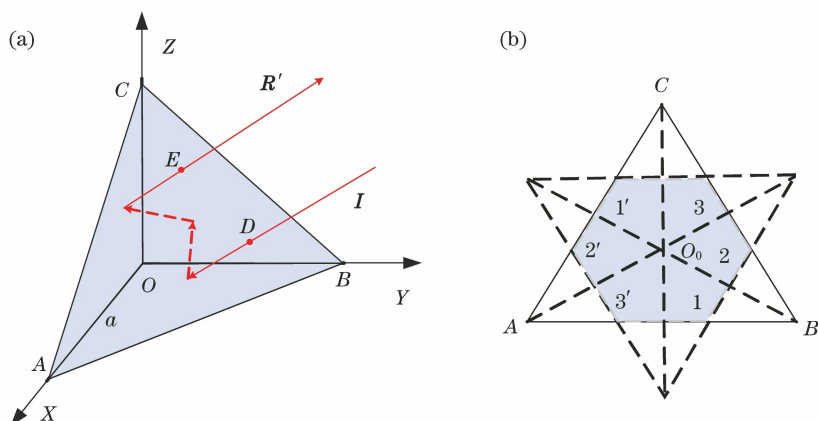


图 2 角锥棱镜光线轨迹及区域划分。(a)光线轨迹;(b)入射区/出射区

Fig. 2 Ray path and region division of cube-corner prism. (a) Ray path; (b) incident zone/exit zone

底面的点(E)的坐标

$$\begin{cases} x = \frac{2l(y_0 + z_0) + (l - m - n)x_0}{l + m + n} \\ y = \frac{2m(x_0 + z_0) + (m - l - n)y_0}{l + m + n} \\ z = \frac{2n(x_0 + y_0) + (n - l - m)z_0}{l + m + n} \end{cases} \quad (5)$$

由点 D 满足底面方程  $x_0 + y_0 + z_0 = a$  以及  $-R'_1 = I'$  可知, D、E 相对于顶点 O 沿入射光线 I 方向在底面 ABC 的投影点对称且入射光线与出射光线间具有一定的偏移量。当入射光线 I 入射到顶点 O 时 D、E 重合, 此时偏移量为零。根据入射光与出射光的对称性, 光线的入射区/出射区如图 2(b)

所示, 光线入射区域与出射区域关于顶点 O 在底面 ABC 的投影点  $O_0$  对称, 如区域 1 与区域 1' 对称。

当具有一定夹角的发射站扫描光扫过棱镜时, 依据上述光线轨迹模型对光线进行定性分析。假设光束以  $I_1$ 、 $I_2$  为边界光线入射, 出射光束将以  $R_1$ 、 $R_2$  为边界光线平行于入射光束反向扩散至光源的上方及下方, 即生成倒立放大的像, 如图 3(a) 所示。在光束扫过棱镜的过程中, 入射光束与出射光束间的偏移量从一定值减小到零再逐渐反向增大。当扫过顶点 O 时, 偏移量为零, 即入射光束与出射光束位于同一平面, 此时等效光路图如 3(b) 所示。

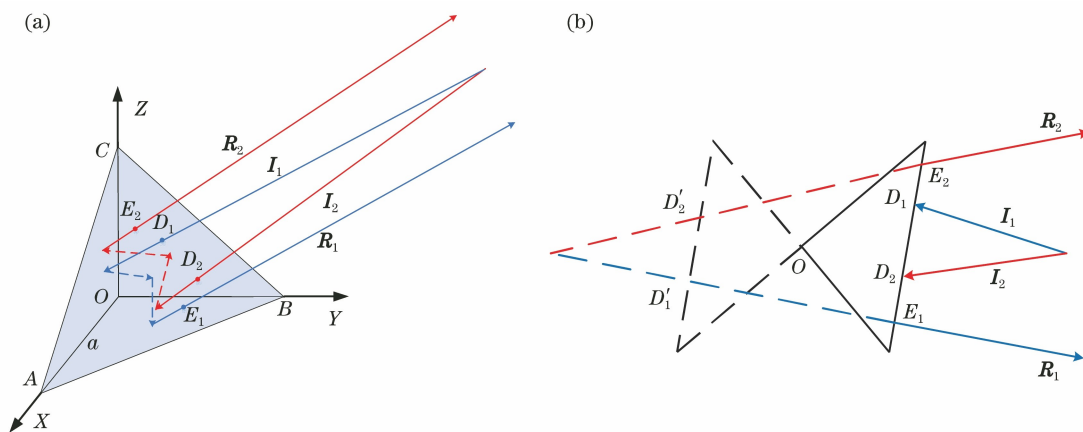


图 3 扫描光回射图及等效光路。(a)回射图;(b)等效光路

Fig. 3 Reflection diagram and equivalent light path of scanning light. (a) Reflection diagram; (b) equivalent light path

针对回射光信号的探测问题, 提出了一种单点双曲面反射接收方法。通过将扫描光发射端的上方设计为非球面反射镜, 可实现回光信号的反射接收。假设回射光 p 位于 YOZ 平面, 在 YOZ 平面上建立

如图 4 所示的二维几何模型, 该模型由旋转对称结构的非球面反射镜和位于原点 O 的雪崩光电二极管(APD)及其接收电路组成。延长线通过双曲面焦点 F 的回射光 p 经反射后到达原点 O, 曲线上的



回射点  $M$ 、焦点  $F$  和顶点  $V$  分别用  $(y, z(y))$ 、 $(0, t)$  和  $(0, k)$  表示, 其中  $z(y)$  是未知曲面的函数方程。光线的回射角和反射角分别定义为  $\alpha$  和  $\beta$ ,  $\mathbf{n}$  是曲面上点  $M$  的法线,  $z'(y)$  是过点  $M$  的切线的斜率。

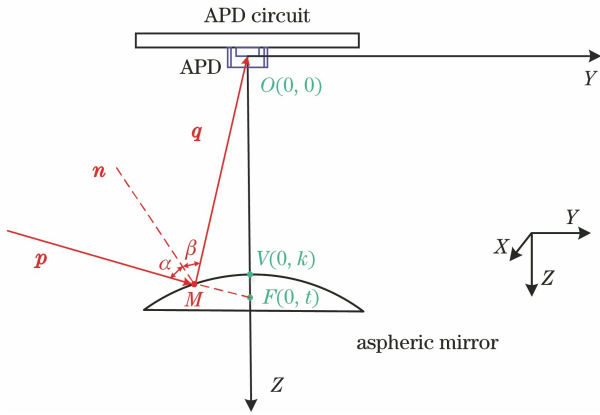


图 4 单点双曲面反射接收器件几何模型

Fig. 4 Geometric model of single point hyperboloid reflection receiver

回射光线  $p$  的单位矢量  $p'$ 、反射光线  $q$  的单位矢量  $q'$  以及曲面的单位法向量  $n$  可以表示为

$$\begin{cases} p' = \left( \frac{y}{\sqrt{y^2 + [t - z(y)]^2}}, \frac{t - z(y)}{\sqrt{y^2 + [t - z(y)]^2}} \right) \\ q' = \left( \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2(y)}}, \frac{z(y)}{\sqrt{y^2 + z^2(y)}} \right) \\ n = \left( \frac{z'(y)}{\sqrt{1 + [z'(y)]^2}}, -\frac{1}{\sqrt{1 + [z'(y)]^2}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

根据矢量理论, 回射角  $\alpha$  和反射角  $\beta$  分别满足  $\cos \alpha = p' \cdot n$  和  $\cos \beta = q' \cdot n$ 。在 Snell 定律中,  $\sin \alpha = \sin \beta$ , 故

$$\cos^2 \alpha = \cos^2 \beta, \quad (7)$$

将 (6) 式代入 (7) 式, 根据边界条件  $z(0) = k$ ,  $z'(0) = 0$  可得

$$z(y) = \frac{1}{2}(t - 2k) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{k(k-t)}} \right]. \quad (8)$$

依据上述单视点反射模型设计用于回光信号反射接收的非球面反射镜。同时, 在 Zemax 中建立基于棱镜 (3.81 cm)、发射站、非球面反射镜以及 APD 接收电路的激光扫描探测光学模型, 如图 5 所示。

定义位于发射站坐标系 XOY 平面上方的棱镜方位角为正, 反之为负。对于不同位置的棱镜, 仿真了扫描光扫至其顶点 O 时 APD 光敏单元的光信号接收效果, 仿真结果如图 6 所示。图 6(a)、(b) 分别是扫描光 1、2 的仿真结果。结果表明, 所设计的非

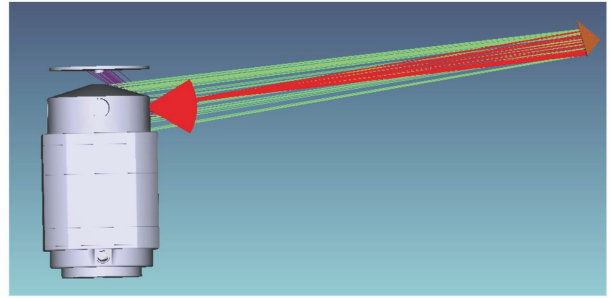


图 5 旋转激光扫描探测光学模型

Fig. 5 Optical model of rotating laser scanning detection  
球面反射镜可以接收方位角在  $-5^\circ \sim 20^\circ$  内棱镜的回光信号。

利用 APD 接收电路记录扫描光到达顶点 O 的时刻, 为了实现角度测量功能, 还需要准确判断扫描光的初始位置。在无源多靶点旋转激光扫描探测平台中不再触发同步光脉冲, 而是直接将发射站基座内部的零位信号引入位于发射站上方的 APD 接收电路中, 进而实现与同步脉冲激光器相同的起始时刻计时功能。

### 3 光信号的延时分析及匹配

#### 3.1 信号延时分析

wMPS 基于时空转换思想对封闭圆周所对应的周期时间进行精确细分, 进而获得空间上的角度信息。由于光信号飞行传输和信号的电路处理等过程的存在, 故 wMPS 发射站的扫描光信号和同步光信号均存在一定的延时。

扫描光信号的延时取决于光信号飞行延时, 同步光信号的延时取决于同步光电路触发延时和光信号飞行延时。其中, 光信号飞行延时是指光信号在空中飞行传输的时间, 与发射站和待测点的空间距离有关。同步光电路触发延时是指发射站转台单周旋转至零位起点, 同步光电路对此刻生成的零位信号进行分频、整形处理, 最终触发同步脉冲激光器所经历的时间, 与零位信号经过同步光触发电路中主要器件的时间有关<sup>[19]</sup>。将有源接收器作为待测点时的测量时间误差如图 7(a) 所示。当将棱镜作为待测点时, 由于零位信号被直接引入发射站上方的 APD 接收电路中, 故相比同步光触发模式, 测量过程中没有同步光信号飞行延时和同步光电路触发延时, 仅存在扫描光信号飞行延时, 对应的测量时间误差如图 7(b) 所示。

在有源接收器模式下, 假设  $t_0$ 、 $t'_0$  分别为生成零位信号的实际时刻和同步光信号到达有源接收器的

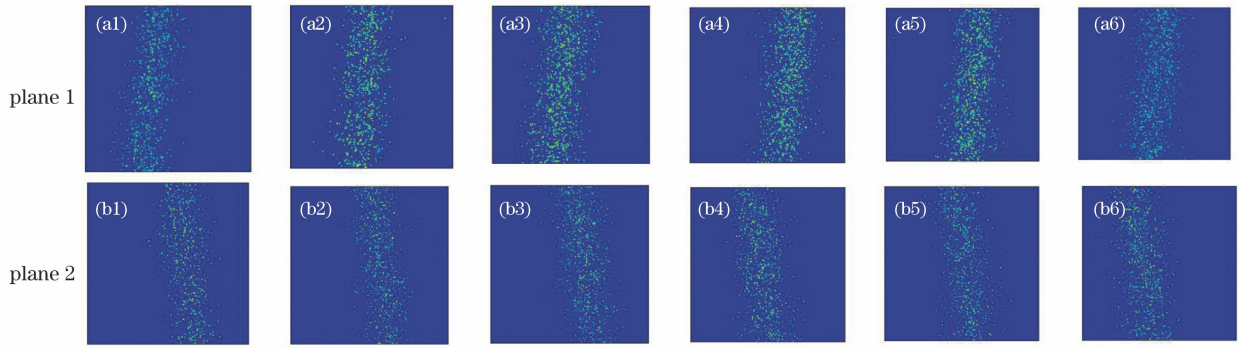


图 6 不同方位角的反射接收仿真。(a1)(b1)  $-5^\circ$ ; (a2)(b2)  $0^\circ$ ; (a3)(b3)  $5^\circ$ ; (a4)(b4)  $10^\circ$ ; (a5)(b5)  $15^\circ$ ; (a6)(b6)  $20^\circ$

Fig. 6 Simulation of reflection receiving with different azimuths. (a1)(b1)  $-5^\circ$ ; (a2)(b2)  $0^\circ$ ; (a3)(b3)  $5^\circ$ ; (a4)(b4)  $10^\circ$ ; (a5)(b5)  $15^\circ$ ; (a6)(b6)  $20^\circ$

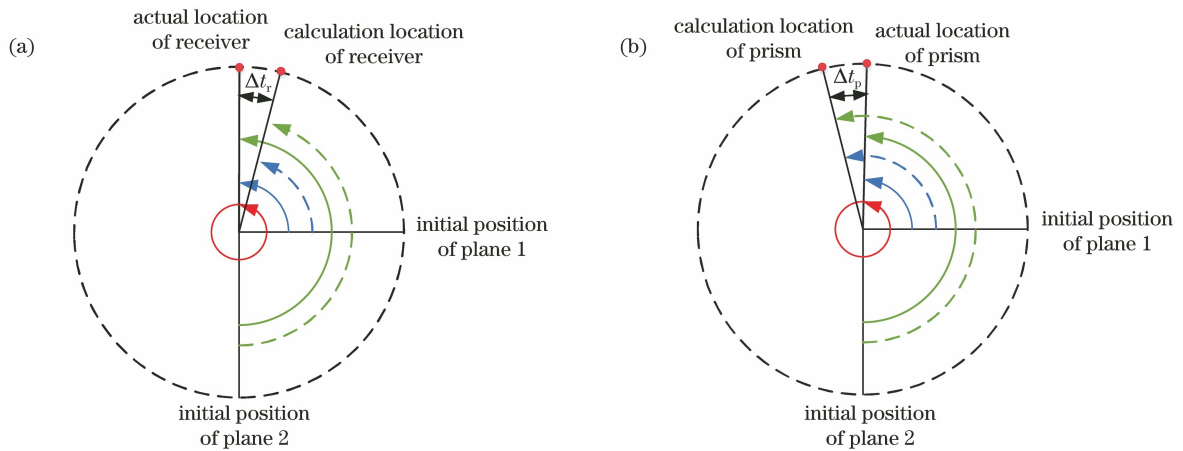


图 7 测量时间误差示意图。(a)有源接收器模式;(b)棱镜模式

Fig. 7 Schematic diagram of measurement time error. (a) Active receiver mode; (b) prism mode

时刻,扫描光 1、2 实际发出的时刻为  $t_1, t_2$ , 扫描光信号到达有源接收器的时刻为  $t'_1, t'_2$ ,  $\Delta t_c$  为同步光电路触发延时,  $\Delta t_f$  为光信号飞行延时。此时同步光信号的延时  $t_0 - t'_0$  和扫描光信号的延时  $t_{i_1} - t'_{i_1}$  可分别表示为

$$\begin{cases} t'_0 - t_0 = \Delta t_c + \Delta t_f \\ t'_{i_1} - t_{i_1} = \Delta t_f \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $i_1 = 1, 2$  表示扫描光信号的序号。扫描光从起点扫到有源接收器的测量时间误差  $\Delta t_r$  为

$$\Delta t_r = (t'_{i_1} - t'_0) - (t_{i_1} - t_0) = -\Delta t_c. \quad (10)$$

在棱镜模式下,在发出扫描光到光信号回射至 APD 接收电路的过程中,光信号的飞行传输距离为发射站和有源接收器间空间距离的两倍,即光信号飞行延时为  $2\Delta t_f$ 。由于不存在同步光信号的延时,故扫描光从起始位置转到棱镜位置的测量时间误差  $\Delta t_p$  为

$$\Delta t_p = 2\Delta t_f. \quad (11)$$

光信号飞行延时与发射站和待测点间空间距离的关系符合  $\Delta t_f = s/c$ , 其中  $s$  为测量距离,  $c$  为光在真空中的传播速度。在有源接收器模式中,同步光电路触发延时的典型值为  $\Delta t_c = 190 \text{ ns}^{[20]}$ , 此时有源接收器模式的测量时间误差为  $\Delta t_r = -190 \text{ ns}$ 。目前棱镜模式的最远测量距离约为  $10 \text{ m}$ , 以  $10 \text{ m}$  的测量距离为例,棱镜模式的测量时间误差为  $\Delta t_p = 66.7 \text{ ns}$ , 该值小于  $|\Delta t_r|$ , 此时可认为棱镜模式的测量精度与有源接收器模式相近。

### 3.2 光信号的匹配

所提定位方法中使用的多个棱镜被固定地布置在被测物体上。当某个发射站的扫描光扫过各个棱镜时,回光信号均被回射至该发射站上方的 APD 接收电路中,需要对混叠的回光信号进行光信号的识别匹配。根据发射站转台上两束扫描光垂直安装的特点,当被测物体移动时存在的测量情况:1)所有棱镜均位于两扫描光的  $90^\circ$  夹角外;2)所有棱镜均位于两扫描光的  $90^\circ$  夹角内;3)棱镜分布在两扫描

光的 90° 夹角的内部和外部。两扫描光逆时针方向扫过各种测量情况的棱镜时产生的信号如图 8

所示,其中  $t_0$  和  $t_0 + T$  是相邻周期零位信号的时刻值。

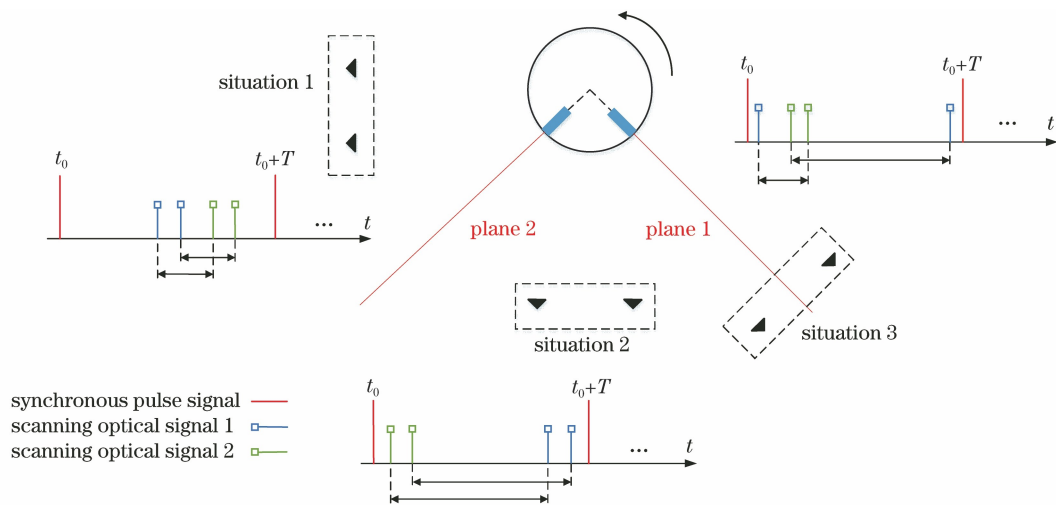


图 8 发射站扫描光顺序示意图

Fig. 8 Schematic diagram of scanning light sequence of transmitting station

当两扫描光扫过某个棱镜时,具有以下特点。

- 1) 当扫描光平面 1 先于扫描光平面 2 扫过棱镜时,两束扫描光信号的时间间隔约为  $T/4$ 。
- 2) 当扫描光平面 2 先于扫描光平面 1 扫过棱镜时,两束扫描光信号的时间间隔约为  $3T/4$ 。

对于位于某区域的  $n$  个棱镜,扫描光 1、2 均按照横向分布顺序先后扫描。在单周期内将产生  $2n$  个光信号且前  $n$  个光信号与后  $n$  个光信号按顺序相对应,组成扫过  $n$  个棱镜的  $n$  组时间序列。对于每组时间序列,可以根据时间序列中的两个光信号的时间间隔约等于  $T/4$  或  $3T/4$  的特点来建立两个光信号与扫描光 1、2 的对应关系。

测量时首先在起始位置分别单独记录  $n$  个棱镜的时间序列,用于后续匹配光信号。在被测物体移动过程中,发射站转台高速旋转(20~50 r/s)向空间发射扫描光,由于单个旋转周期内被测物体的位移量很小,故同一棱镜相邻周期的前后两组时间序列差值将很小。因此,在被测物体移动的过程中,某周期内如何正确匹配  $n$  组时间序列所对应棱镜编号的问题可以转化为对该周期内  $n$  组时间序列排列组合,求解相邻周期时间序列差值最小的问题。

假设上一周期正确对应了棱镜编号的  $n$  组时间序列为  $(\Delta t_{1,p}, \Delta t_{2,p})$ ,其中  $p$  是棱镜的编号,  $p = 1, 2, \dots, n$ 。下一周期产生的  $n$  组时间序列为  $(\Delta t'_{1,q}, \Delta t'_{2,q})$ ,其中  $q = 1, 2, \dots, n$ 。若  $(\Delta t'_{1,q}, \Delta t'_{2,q})$  正确地对应了各个棱镜,则满足

$$\min(f) = \sum_{k_1=0}^n [(\Delta t'_{1,k_1} - \Delta t_{1,k_1})^2 + (\Delta t'_{2,k_1} - \Delta t_{2,k_1})^2] \quad (12)$$

变换待匹配周期  $n$  组时间序列的排列组合关系进而求得  $A_n^n$  组  $f$  值,  $\min(f)$  对应的  $n$  组时间序列的排序就是该周期正确匹配了棱镜编号的时间序列。

## 4 实验与分析

结合实验室现有设备,使用 wMPS 发射站构建旋转激光扫描探测平台,在 15 m×7 m×2.8 m 的测量空间内使用 2.3 m×2.1 m 的工装架模拟待测物体进行实验。实验设备主要包括 wMPS 发射站、棱镜(3.81 cm)、工装架和作为测量基准的 Leica AT901-LR 激光跟踪仪,实验现场布置如图 9 所示。其中,wMPS 发射站可实现垂直方向  $-30^\circ \sim 30^\circ$  及水平方向  $360^\circ$  范围内扫描测量,精测模式下测角精度可达  $\pm 2''$ ,棱镜的对心误差小于  $\pm 0.003$  mm, Leica AT901-LR 激光跟踪仪的基本误差为 15  $\mu\text{m}$ ,并且测量距离每增加 1 m,将会增加 6  $\mu\text{m}$  的误差。实验前,在工装架的不同位置固定 6 个棱镜,并选定工装架中间位置为坐标系原点  $O_b$  建立待测物坐标系。

wMPS 发射站的内部参数已经通过提前标定得到,分别为  $a_1 = 0, b_1 = -0.814667, c_1 = 0.579930, d_1 = 0, a_2 = -0.851563, b_2 = -0.002132, c_2 = 0.524248, d_2 = 0.688649$ 。同时,使用激光跟踪仪标



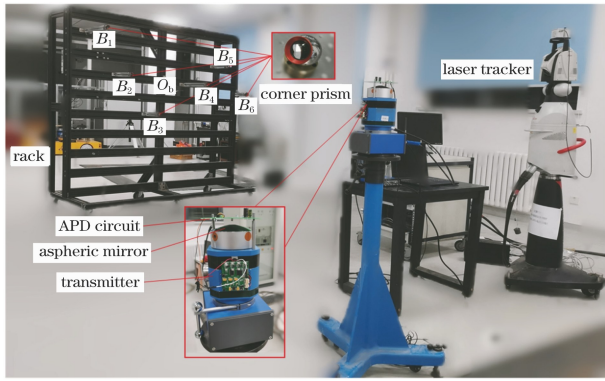


图 9 实验场景

Fig. 9 Experimental scene

定各个棱镜的坐标,即待测物的结构参数,标定结果如表 1 所示。

#### 4.1 不同模式的对比测量

对于同一待测位置,在有源接收器模式和棱镜模式下分别重复测量扫描时间  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  以对比两种模式的测量结果。实验时改变发射站和待测位置之间的距离,分别在 4 m、8 m 的距离以 1 min 为间隔重复测量 2 h。对扫描时间  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  进行  $\Delta t_{i_1}/T$  归一化处理后得到的测量数据如图 10 所示,其中  $t$  为总测量时间。实验中发射站转速为 1800 r/min。

表 1 待测物结构参数标定结果

Table 1 Calibration results of structural parameters of object to be measured

unit: mm

Parameter	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$O_b$
$x_b$	547.36	345.81	89.02	-422.76	-706.60	-1004.30	0.00
$y_b$	807.52	528.60	335.20	284.27	-82.31	-255.89	0.00
$z_b$	386.46	-30.72	-443.91	-107.36	122.17	-202.91	0.00

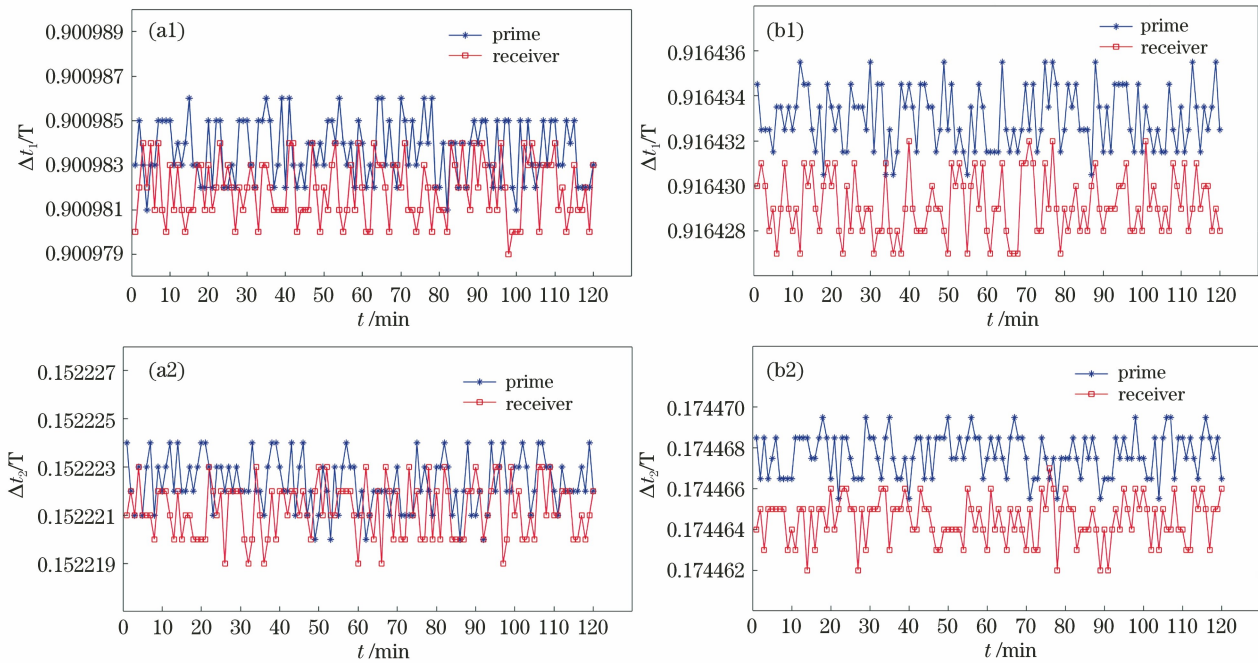


图 10 不同距离处的信号测量结果对比。(a1)(a2) 4 m; (b1)(b2) 8 m

Fig. 10 Comparison of signal measurement results at different distances. (a1)(a2) 4 m; (b1)(b2) 8 m

对比结果显示,在 2 h 的测量时间内,当距离为 4 m 时,两种模式的  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  的最大值与最小值之间的偏差分别为  $6.8 \times 10^{-6}$ 、 $5.3 \times 10^{-6}$ ;当距离为 8 m 时,两种模式的  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  的最大值与最小值之间的偏差分别为  $8.7 \times 10^{-6}$ 、 $8.1 \times 10^{-6}$ 。若将  $\Delta t_{i_1}/T$  精确细分为  $1.296 \times 10^6$ ,则可将  $\Delta t_{i_1}/T$  转化为角度,此时  $7.7 \times 10^{-7}$  对应  $1''$ 。上述测量结果

的角度误差均保持在可接受范围内且两种测量模式的测量结果相近。

#### 4.2 光信号匹配实验

为了验证光信号匹配方法的可行性,移动工装架,对光信号进行匹配。实验前,在起始位置分别测量各个棱镜对应的扫描时间  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  并进行  $\Delta t_{i_1}/T$  归一化处理,具体时刻值如表 2 所示。然后,移动工



装架,连续记录 3 组不同位置处的待匹配光信号。同时,使用有源接收器在同一位置接收光信号用于对比。归一化处理后的待匹配光信号时刻值如表 3 所示。

表 2 棱镜对应时刻值

Table 2 Corresponding time values of prisms

Scanning time	Prism 1	Prism 2	Prism 3	Prism 4	Prism 5	Prism 6
$\Delta t_1$	0.903994	0.888583	0.882659	0.877732	0.860884	0.843388
$\Delta t_2$	0.164404	0.159718	0.144891	0.126459	0.123458	0.120461

由 3.1 节的匹配方法可知,待匹配光信号在单周期内前 6 个光信号与后 6 个光信号按顺序相互对应。由于光信号时间间隔约等于  $3T/4$ ,故扫描光 2 先于扫描光 1 扫过各个棱镜。在每个位置处求解  $\min(f)$ ,对应  $\min(f)$  的时间序列  $(\Delta t'_{1,q}, \Delta t'_{2,q})$  以及有源接收器测量结果如表 4 所示。

表 4 时间序列匹配结果

Table 4 Time series matching results

Measuring point	Location		
	1	2	3
Prism 1	(0.899173, 0.158979)	(0.903080, 0.162542)	(0.895896, 0.154712)
Receiver 1	(0.899170, 0.158976)	(0.903077, 0.162539)	(0.895891, 0.154709)
Prism 2	(0.884736, 0.154528)	(0.889926, 0.158463)	(0.883651, 0.150892)
Receiver 2	(0.884733, 0.154525)	(0.889923, 0.158461)	(0.883647, 0.150890)
Prism 3	(0.879136, 0.140520)	(0.884784, 0.145656)	(0.878843, 0.138944)
Receiver 3	(0.879132, 0.140516)	(0.884780, 0.145652)	(0.878839, 0.138941)
Prism 4	(0.874662, 0.123491)	(0.880765, 0.130247)	(0.875142, 0.124668)
Receiver 4	(0.874660, 0.123487)	(0.880771, 0.130242)	(0.875138, 0.124663)
Prism 5	(0.858969, 0.120665)	(0.866522, 0.127692)	(0.861905, 0.122292)
Receiver 5	(0.858965, 0.120662)	(0.866517, 0.127688)	(0.861901, 0.122289)
Prism 6	(0.842701, 0.117803)	(0.851776, 0.125096)	(0.848227, 0.119886)
Receiver 6	(0.842698, 0.117801)	(0.851772, 0.125092)	(0.848223, 0.119881)

通过对比可知,3 组不同位置的  $\min(f)$  对应的光信号匹配结果均与有源接收器测量结果保持一致,进而可以利用该光信号匹配机制在移动过程中实现对光信号的匹配。

### 4.3 定位精度验证实验

在定位精度验证实验中,将激光跟踪仪作为测量基准以评价无源多靶点定位方法的定位精度。测量时,在测量空间内移动工装架 10 次,每个位置重复测量 20 次并将待测物坐标系原点  $O_b$  空间坐标的平均值作为测量结果与激光跟踪仪进行比对。三维坐标测量结果如表 5 所示,其中误差为无源多靶

表 3 待匹配光信号时刻值

Table 3 Time values of optical signals to be matched

Optical signal	Location		
	1	2	3
1	0.117803	0.125096	0.119886
2	0.120665	0.127692	0.122292
3	0.123491	0.130247	0.124668
4	0.140520	0.145656	0.138944
5	0.154528	0.158463	0.150892
6	0.158979	0.162542	0.154712
7	0.842701	0.851776	0.848227
8	0.858969	0.866520	0.861905
9	0.874662	0.880765	0.875142
10	0.879136	0.884784	0.878843
11	0.884736	0.889926	0.883651
12	0.899173	0.903080	0.895896

点测量定位方法测量结果与激光跟踪仪测量结果的对比误差。

根据每个位置处的 20 次重复测量数据,计算相应的标准差,结果如图 11 所示。

由实验结果可知,在最远测量距离约 10 m 的实验中 X 方向,Y 方向,Z 方向的最大误差分别为 0.57,0.79,0.73 mm。各方向对应的标准差小于 0.17 mm,重复测量的数据无粗大误差,坐标波动主要受 wMPS 发射站瞬时转速的影响。因此,在 10 m 的测量范围内,所提的无源多靶点定位方法在三个方向上能够达到亚毫米级的定位精度。所提方

表 5 三维坐标测量结果

Table 5 Coordinate measurement results

Location	Coordinate /mm			Error /mm		
	$x$	$y$	$z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
1	3904.96	-2197.95	240.93	0.37	-0.51	-0.40
2	4418.96	-2314.99	248.22	0.39	-0.35	0.42
3	4763.94	-2607.79	254.34	0.54	0.28	0.58
4	4883.87	-3291.28	256.14	0.41	-0.12	-0.31
5	5403.99	-3593.36	259.11	-0.22	-0.30	-0.33
6	5749.52	-3974.67	263.04	-0.37	-0.39	-0.36
7	6128.32	-4377.98	268.78	-0.33	-0.27	-0.32
8	6170.88	-4997.14	266.78	-0.49	0.35	0.73
9	6421.57	-5383.60	267.33	-0.57	0.67	0.64
10	6951.27	-5630.32	263.59	-0.43	0.79	0.34

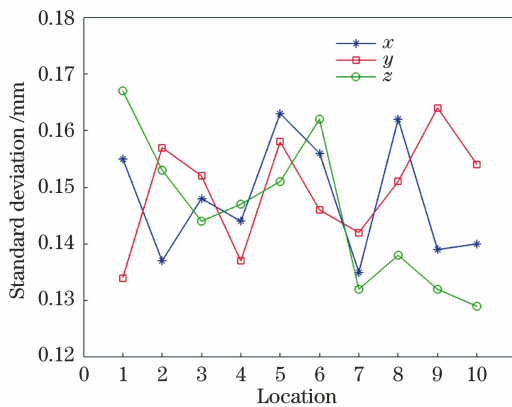


图 11 不同位置的标准差

Fig. 11 Standard deviation of different locations

法在保证较好的测量精度的前提下,有效提高了旋转激光扫描测量系统的适应性,表明其在复杂工业测量现场应用中具有可行性。

## 5 结 论

提出了一种使用角锥棱镜将待测目标无源化的无源多靶点定位方法。针对该方法,对光信号的反射接收模型、信号的延时进行了详细研究。同时,基于单台发射站的无源多靶点交会定位,建立了光信号的匹配机制。实验结果表明,在 10 m 测量范围内,所提的无源多靶点交会定位方法在三个方向上能够达到亚毫米级的定位精度,满足工业测量现场的定位需求,有效提高了旋转激光扫描测量系统的适应性。此外,相比有源接收器模式,该模式的测量距离大大减小,为了将该定位方法应用于各种工业测量现场中,未来将重点研究如何有效增加测量距离等问题。

## 参 考 文 献

- [1] Campos Porath M, Simoni R, Araujo Nunes R, et al. Feasibility of measurement-assisted assembly of ship hull blocks [J]. *Marine Systems & Ocean Technology*, 2019, 14(1): 23-33.
- [2] 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.
- [3] Pan T Y, Fan B X, Yi W M, et al. Overview of large-scale dynamic measurement metrology [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(8): 70-72, 76.  
潘廷耀, 范百兴, 易旺民, 等. 大尺寸动态测量技术综述 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(8): 70-72, 76.
- [4] Maisano D A, Jamshidi J, Franceschini F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3(3): 335-349.
- [5] Ma H Y, Lin J R, Zhang R, et al. Research on key technologies for large-scale distributed measurement network reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1112001.  
马慧宇, 林嘉睿, 张饶, 等. 大尺寸分布式测量网络重构关键技术研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1112001.
- [6] Ren Y, Liu F F, Fu Y X, et al. Placement optimization of laser multilateration network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011201.  
任瑜, 刘芳芳, 傅云霞, 等. 激光多边测量网布局优化研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011201.
- [7] Lin J R, Guo F, Qi F, et al. Innovative measurement technology for digital shipbuilding [J]. *China*

- Measurement & Test, 2018, 44(12): 1-5, 18.  
林嘉睿, 郭烽, 齐峰, 等. 船舶数字化制造的测量技术创新[J]. 中国测试, 2018, 44(12): 1-5, 18.
- [8] Qi Z M, Zhou X F, Zhu J H, et al. Method to diverge reflected beam using planoconcave lens and normal cube-corner prism [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1123002.  
戚祖敏, 周晓凤, 朱建辉, 等. 利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1123002.
- [9] Fuhrmann T, Garthwaite M C, McClusky S. Investigating GNSS multipath effects induced by co-located Radar Corner Reflectors [J]. Journal of Applied Geodesy, 2021, 15(3): 207-224.
- [10] Zhang H F, Cheng Z E, Li P, et al. Design of lidar cooperative target and its application to space rendezvous and docking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2556-2561.  
张海峰, 程志恩, 李朴, 等. 激光雷达合作目标设计及其在空间交会对接中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2556-2561.
- [11] Hammar A, Park W, Chang S, et al. Wide-field off-axis telescope for the Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography Spectroscopy satellite [J]. Applied Optics, 2019, 58(6): 1393-1399.
- [12] Zhu G Y. Research on large field of view receiving optical system for MEMS lidar[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 24-28.  
朱国宜. 用于 MEMS 激光雷达的大视场接收光学系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 24-28.
- [13] Qi L L, Zheng L H, Ye L, et al. Convexaspheric surface testing method using an autocollimation lens [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0822001.  
戚丽丽, 郑列华, 叶璐, 等. 自准校正单透镜检验凸非球面的方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0822001.
- [14] Wang W F, Yang X X, Zhang H J, et al. Design of catadioptric infrared optical system with wide field [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4568-4573.
- [15] Fu T Q, Ma T Y, Wang Y F, et al. GPS/INS delay estimation and delay compensation based on residual reconstruction [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(10): 1210-1217.  
付廷强, 马太原, 王亚飞, 等. GPS/INS 延时估计与基于残差重构的延时补偿算法[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(10): 1210-1217.
- [16] Yang L H, Yang X Y, Lao D B, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1105-1109.  
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, 39(6): 1105-1109.
- [17] 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.
- [18] Abdel-Aziz Y I, Karara H M, Hauck M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [19] 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.
- [20] Guo T C, Ren Y J, Lin J R, et al. Delay compensation for synchronization signal in rotating laser-scanning measurement system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0312002.  
郭同闯, 任永杰, 林嘉睿, 等. 旋转激光扫描测量系统同步信号电路延时补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0312002.