

基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统

李桂存^{1,2}, 方亚秘^{1,2*}, 纪荣祚^{3**}, 张滋黎^{3,4}, 张浩^{1,2}, 牟金震^{1,2}, 宋婷^{1,2}

¹上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

²上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109;

³中国科学院光电研究院, 北京 100094;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统; 基于光线追迹方法建立跟踪系统的几何光学模型, 并对跟踪系统进行误差分析, 通过仿真对激光跟踪系统的指向精度以及跟踪性能进行分析。仿真结果表明: 在跟踪距离 100 m 处, 跟踪系统的位置指向精度可达 0.35 mm, 角度指向精度为 0.72", 跟踪范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 最大跟踪速度可达 3.6 rad/s, 能够实现对远距离快速运动目标的高精度实时主动跟踪。

关键词 测量; 激光跟踪; 二维振镜; 位置灵敏探测器; 误差分析

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704007

High-Precision Laser Tracking System Based on Two-Dimensional Galvanometers and Position Sensitive Detectors

Li Guicun^{1,2}, Fang Yami^{1,2*}, Ji Rongyi^{3**}, Zhang Zili^{3,4}, Zhang Hao^{1,2},
Mu Jinzhen^{1,2}, Song Ting^{1,2}

¹Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

²Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China;

³Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A high-precision laser tracking system based on a two-dimensional galvanometer and position sensitive detector is proposed. A geometrical optics model of the tracking system is established using the ray tracing method, and error analysis is performed to simulate positioning precision and tracking performance of the proposed laser tracking system. Simulation results demonstrate that, when the target is located at a distance of 100 m, the tracking system's point position precision is 0.35 mm, angular precision is 0.72", tracking range is -10° to 10° , and maximum tracking speed is 3.6 rad/s. These results indicate that the system can realize high precision and real-time active detection tracking for fast moving targets at long distances.

Key words measurement; laser tracking; two-dimensional galvanometer; position sensitive detector; error analysis

OCIS codes 120.1880; 100.4999

1 引 言

随着航天科学研究和国防军事拓展的发展,微小卫星精密编队飞行技术对大范围动态跟踪精度的要

求越来越高^[1],激光跟踪测量技术因具有精度高、速度快、非接触测量的优点而在精密编队飞行领域得到了广泛应用。激光跟踪测量系统一般由激光测距系统、二维测角系统、反馈控制系统和目标靶镜等组

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-28; 录用日期: 2019-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61690214)、国家重点研发计划(2016YFB0501003)、民用航天预研项目(D020214)、航天八院自主研发项目(ZY2018-46)

* E-mail: fangyami@163.com; ** E-mail: jirongyi@aoe.ac.cn

成^[2-3]。其中:激光测距系统测量目标的距离信息;二维测角系统提供目标的精确方位信息,从而获取三维空间的位置信息;反馈控制系统基于返回光斑的位置信息,实时控制执行机构,实现动态目标的跟踪。

目前,以激光跟踪仪为代表的激光跟踪测量系统大多采用二维精密转台和二维精密圆光栅测角技术^[4-5]。圆光栅编码测角精度高(精度为 $0.2''$)、分辨率高(分辨率为 $0.001''$),但是必须固定在圆形转台上,体积、质量较大,不适合轻量化及快速实时跟踪测量^[6]。冯斌等^[7]提出了基于转镜和高速电荷耦合器件(CCD)相机的同步跟踪系统,并采用该系统来跟踪高速飞行弹丸的运动姿态,其理论模拟跟踪精度为 3 mm ;赵怀学等^[8]依据蒙特卡罗方法对测量站姿态测量数据进行误差分析,得出了影响姿态角测量精度的主要因素,并对检测方法进行优化,航向角和俯仰角测量误差分别不大于 1.9° 和 0.4° 。在现有的跟踪测量系统中,无论是位置跟踪精度,还是角度跟踪精度,都无法满足精密编队飞行任务对卫星的高精度跟踪需求。

二维振镜具有体积小、响应快、精度高、非接触测量等优点,被广泛应用于二维光机扫描技术领域,可实现俯仰和航向2个方向的扫描^[9-11]。采用二维振镜与位置灵敏探测器(PSD)相结合的跟踪机构进

行跟踪控制和角度偏移测量,可大幅减小跟踪机构的体积、质量和复杂度,从而实现目标的动态快速精密跟踪及亚角秒量级的角度偏移测量。

针对卫星精密编队飞行中对米级到百米级范围内的卫星进行亚毫米量级位置跟踪以及角秒量级角度跟踪的测量需求,本文提出了一种基于二维振镜与PSD的低成本、高精度、实时主动跟踪系统,建立跟踪光路模型,利用光线追迹的方法对激光跟踪光路进行光线追踪,对激光跟踪系统的性能进行数值仿真,并对跟踪系统进行误差分析。

2 高精度激光跟踪系统简介

基于二维振镜与PSD的高精度激光跟踪系统如图1所示(A_1 为入射光线方向的单位矢量)。该系统主要可分为激光测距系统、跟踪光路、跟踪控制电路部分。跟踪光路部分主要由分束镜、二维振镜、PSD、靶球组成,跟踪控制电路部分包括PSD信号处理电路和振镜反馈控制电路,激光测距系统用于实现高精度的距离测量。PSD用来探测由靶球返回的激光光斑位置的偏移^[12]。PSD信号处理电路将获取的偏移位置信息发送给振镜反馈电路,从而快速调整激光光束的指向,消除由目标靶球运动引起的光斑位移,实现对目标靶球的动态实时跟踪。

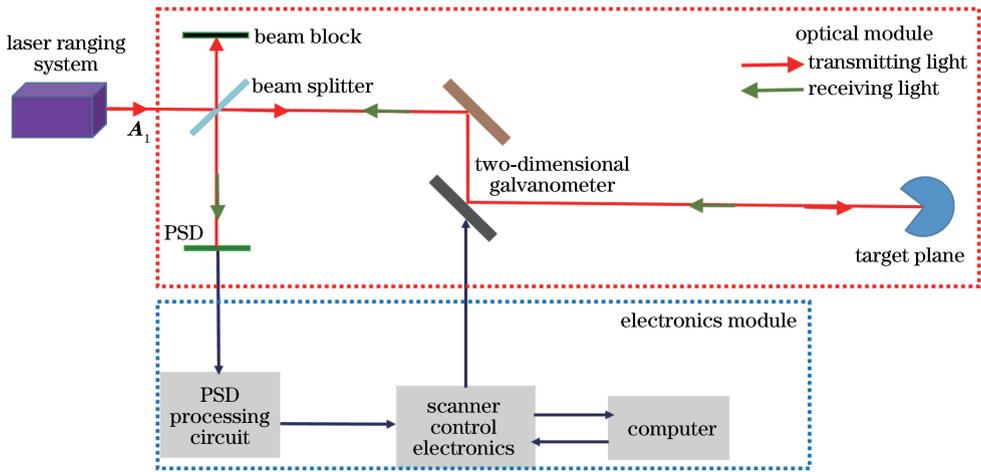


图1 基于二维振镜与PSD的高精度激光跟踪系统示意图

Fig. 1 Diagram of high-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and PSD

3 几何光学模型

基于二维振镜与PSD的高精度激光跟踪系统的几何光学模型如图2所示,其中 q 为探测面的单位法向量, N_1 、 N_2 分别为两个振镜平面单位法向量。激光测距系统发出的激光经分束镜分束后经2个振镜(振镜1的旋转中心为 O_1 ,振镜2的旋转中

心为 O_2)反射后入射到目标靶球,被靶球反射后的光再经过分束镜,一部分光返回激光测距系统用以测距,另一小部分光被反射到PSD,用以进行位置偏移的探测以及振镜的反馈控制。以第2个振镜中心为坐标原点建立左手坐标系, x 、 y 、 z 轴单位方向矢量分别为 i 、 j 、 k 。 $A_1-O_1-O_2-P_0$ 为初始光线传播方向,入射角 α_1 和 α_2 均为 45° ; $A_1-O_1-O_2'-P$ 为

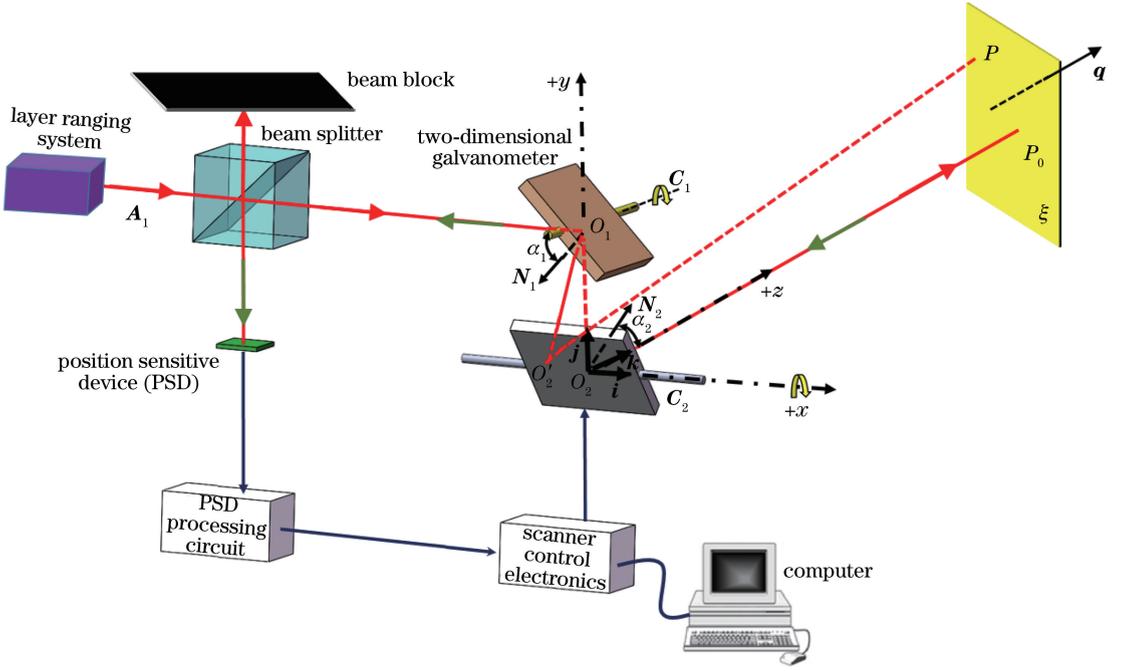


图 2 基于二维振镜与 PSD 的高精度激光跟踪系统几何光学模型

Fig. 2 Geometrical optics model of high-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and PSD

振镜转动后的光线传播轨迹。二维振镜的旋转轴分别为 C_1 和 C_2 , O_1O_2 距离为 a , 靶球面 ξ 与 z 轴垂直, O_2 到探测面的距离为 b 。

由文献[13]可知, 反射定律可用矢量形式表示为

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1 - 2\mathbf{N}(\varphi)[\mathbf{N}(\varphi) \cdot \mathbf{A}_1], \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{N}(\varphi) = & \mathbf{N}(0) \cos \varphi + \\ & \mathbf{C}[\mathbf{C} \cdot \mathbf{N}(0)](1 - \cos \varphi) + [\mathbf{C} \times \mathbf{N}(0)] \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 分别为入射、反射光线方向的单位矢量; $\mathbf{N}(\varphi)$ 为反射镜绕 N 轴旋转 φ 角度后的单位法向量; $\mathbf{N}(0)$ 为反射镜初始单位法线向量; \mathbf{C} 为旋转轴对应的方向向量。

当第 1 个振镜绕 C_1 轴旋转 φ_1 角度时, 出射光线 O_1O_2' 的单位方向矢量 $\mathbf{A}_2(\varphi_1)$ 为

$$\mathbf{A}_2(\varphi_1) = \mathbf{A}_1 - 2\mathbf{N}_1(\varphi_1)[\mathbf{N}_1(\varphi_1) \cdot \mathbf{A}_1], \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{N}_1(\varphi_1) = \mathbf{N}_1(0) \cos \varphi_1 +$$

$$\mathbf{C}_1[\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{N}_1(0)](1 - \cos \varphi_1) + [\mathbf{C}_1 \times \mathbf{N}_1(0)] \sin \varphi_1, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{N}_1(\varphi_1)$ 为第 1 个振镜平面的单位法向量; \mathbf{C}_1 为第 1 个振镜旋转轴对应的方向向量。第 2 个振镜绕 C_2 轴旋转 φ_2 角度后, 单位法向量为

$$\mathbf{N}_2(\varphi_2) = \mathbf{N}_2(0) \cos \varphi_2 +$$

$$\mathbf{C}_2[\mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{N}_2(0)](1 - \cos \varphi_2) + [\mathbf{C}_2 \times \mathbf{N}_2(0)] \sin \varphi_2, \quad (5)$$

式中: \mathbf{C}_2 为第 2 个振镜旋转轴对应的方向向量。

由图 2 可知, O_1O_2' 构成的矢量可写为 $\mathbf{I}_{O_1O_2'} = p_2 \mathbf{A}_2(\varphi_1)$, 其中 p_2 为 $\mathbf{I}_{O_1O_2'}$ 的模。 $\mathbf{N}_2(\varphi_2)$ 与第 2 个振镜平面内的任意向量垂直, 假设 O_1 到第 2 个振镜平面的距离为 a' , 则

$$[\mathbf{I}_{O_1O_2'} + a' \mathbf{N}_2(\varphi_2)] \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2) \equiv 0. \quad (6)$$

由此可得 $p_2 = \frac{-a'}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}$, 利用 $a' = a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)$, 可求得

$$\mathbf{I}_{O_1O_2'} = \frac{-a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)} \mathbf{A}_2(\varphi_1). \quad (7)$$

矢量 $\mathbf{I}_{O_2O_2'}$ 则为

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{O_2O_2'} = \\ \mathbf{I}_{O_2O_1} + \mathbf{I}_{O_1O_2'} = a\mathbf{j} + \frac{-a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)} \mathbf{A}_2(\varphi_1), \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{I}_{O_2O_1}$ 为 O_2O_1 构成的矢量。经第 2 个振镜偏转后的方向矢量 $\mathbf{A}_3(\varphi_2)$ 为

$$\mathbf{A}_3(\varphi_2) = \mathbf{A}_2(\varphi_1) - 2\mathbf{N}_2(\varphi_2)[\mathbf{N}_2(\varphi_2) \cdot \mathbf{A}_2(\varphi_1)]. \quad (9)$$

探测面的单位法向量 \mathbf{q} 与探测面内的任意向

量垂直,且 O_2 到探测面的距离为 b ;同理可计算 O_2P 构成的矢量 \mathbf{I}_{O_2P} 为

$$\mathbf{I}_{O_2P} = \mathbf{I}_{O_2O'_2} + \frac{b - \mathbf{I}_{O_2O'_2} \cdot \mathbf{q}}{\mathbf{A}_3(\varphi_2) \cdot \mathbf{q}} \mathbf{A}_3(\varphi_2), \quad (10)$$

式中: $\mathbf{I}_{O_2O'_2}$ 为 $O_2O'_2$ 构成的矢量。

此外,利用测距仪可获取到探测面的往返飞行时间 t ,则 $ct = 2(l_{A_1O_1} + l_{O_1O'_2} + l_{O'_2P}) = 2(d_t + d_1 + d_2)$,其中 c 为光速, d_t 为计时器到 O_1 的距离, d_1 为 O_1 到 O'_2 的距离, d_2 为 O'_2 到 P 的距离,则

$$d_1 = p_2 = \frac{-a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}, \quad (11)$$

$$d_2 = \frac{1}{2}ct - d_t - d_1. \quad (12)$$

最后可得

$$\mathbf{I}_{O_2P} = a\mathbf{j} + \frac{a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)} \cdot [\mathbf{A}_3(\varphi_2) - \mathbf{A}_2(\varphi_1)] + \left(\frac{1}{2}ct - d_t\right) \mathbf{A}_3(\varphi_2). \quad (13)$$

4 仿真结果分析

4.1 主要仿真参数的选取

如图 2 所示,主要仿真参数选取如下: $\mathbf{A}_1 = \mathbf{i}$, $\mathbf{C}_1 = \mathbf{k}$, $\mathbf{C}_2 = \mathbf{i}$, $\mathbf{q} = \mathbf{k}$, $\mathbf{N}_1(0) = -(\mathbf{i} + \mathbf{j})/\sqrt{2}$, $\mathbf{N}_2(0) = (\mathbf{j} + \mathbf{k})/\sqrt{2}$, $a = 0.05$ m, $d_t = 0.05$ m, $b = 100$ m. 将仿真参数代入(3)~(5)式和(9)式,可得

$$\mathbf{N}_1(\varphi_1) = -\frac{1}{\sqrt{2}}[(\cos \varphi_1 + \sin \varphi_1)\mathbf{i} + (\cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)\mathbf{j}], \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_2(\varphi_1) = -\sin(2\varphi_1)\mathbf{i} - \cos(2\varphi_1)\mathbf{j}, \quad (15)$$

$$\mathbf{N}_2(\varphi_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\cos \varphi_2 + \sin \varphi_2)\mathbf{j} + (\cos \varphi_2 - \sin \varphi_2)\mathbf{k}], \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_3(\varphi_2) = -\sin(2\varphi_1)\mathbf{i} + \cos(2\varphi_1)\sin(2\varphi_2)\mathbf{j} + \cos(2\varphi_1)\cos(2\varphi_2)\mathbf{k}. \quad (17)$$

将(15)式和(16)式代入(8)式,可得

$$\mathbf{I}_{O_2O'_2} = a\mathbf{j} + \frac{-a\mathbf{j} \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)}{\mathbf{A}_2(\varphi_1) \cdot \mathbf{N}_2(\varphi_2)} \mathbf{A}_2(\varphi_1) = -a \tan(2\varphi_1)\mathbf{i}. \quad (18)$$

$$\text{因此, } p_3 = \frac{b - \mathbf{I}_{O_2O'_2} \cdot \mathbf{q}}{\mathbf{A}_3(\varphi_2) \cdot \mathbf{q}} = \frac{b}{\cos(2\varphi_1)\cos(2\varphi_2)}.$$

将所得结果代入(10)式,可得

$$\mathbf{I}_{O_2P} = \mathbf{I}_{O_2O'_2} + p_3 \mathbf{A}_3(\varphi_2) =$$

$$-\tan(2\varphi_1) \left[a + \frac{b}{\cos(2\varphi_2)} \right] \mathbf{i} + b \tan(2\varphi_2) \mathbf{j} + b \mathbf{k}, \quad (19)$$

亦即激光束出射点的空间坐标为

$$\begin{cases} x_P = -\tan(2\varphi_1) \left[a + \frac{b}{\cos(2\varphi_2)} \right] \\ y_P = b \tan(2\varphi_2) \\ z_P = b \end{cases}. \quad (20)$$

考虑测距仪结果,将空间坐标换成与时间相关的参量,将(15)~(17)式代入(13)式,可得空间位置的分量为

$$\begin{cases} x_P = \left(d_t - \frac{1}{2}ct \right) \sin(2\varphi_1) \\ y_P = \sin(2\varphi_2) \left[\left(\frac{1}{2}ct - d_t \right) \cos(2\varphi_1) - a \right] \\ z_P = \cos(2\varphi_2) \left[\left(\frac{1}{2}ct - d_t \right) \cos(2\varphi_1) - a \right] \end{cases}. \quad (21)$$

4.2 跟踪系统性能

4.2.1 误差分析

设 $a = 0.05$ m, $b = 100$ m,利用(20)式得到在跟踪范围 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 内步长为 1° 的扫描轨迹,如图 3 所示.由图 3 可知,在 100 m 处的水平和垂直视场范围可以达到 78 m.此外,扫描轨迹存在枕形失真,在扫描平面的中心附近枕形失真最小,而在边缘处枕形失真较大^[14].因此,在扫描平面中心处的扫描精度较高,边缘处因有较大畸变而使得空间指向精度较低.

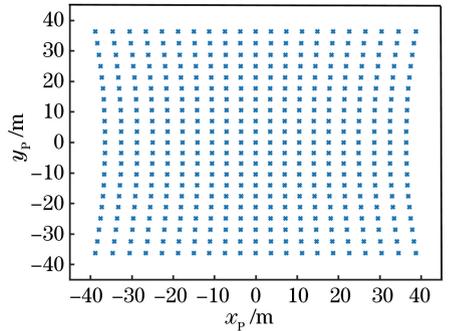


图 3 二维振镜的扫描轨迹

Fig. 3 Scanning pattern of two-dimensional galvanometer

为了研究跟踪系统的跟踪精度,假定 2 个振镜角度的控制相互独立,角度转动精度为 δ_{φ_1} 和 δ_{φ_2} (1σ ,其中 σ 为振镜转动角度的标准差),且服从正态分布.现有二维振镜的角度转动精度可达 $1.5 \mu\text{rad}$ ($0.3''$)^[15].由误差传递原理可知, P 点在 x 、 y 方向的指向精度 δ_x 、 δ_y ,以及坐标标准差 δ_{x_y} ^[13] 分别为

$$\begin{cases} \delta_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x_P}{\partial \varphi_1} \delta_{\varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_P}{\partial \varphi_2} \delta_{\varphi_2}\right)^2} \\ \delta_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y_P}{\partial \varphi_1} \delta_{\varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_P}{\partial \varphi_2} \delta_{\varphi_2}\right)^2} \\ \delta_{xy} = \sqrt{\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2}} \end{cases} \quad (22)$$

将仿真参数 $a = 0.05 \text{ m}$ 、 $b = 100 \text{ m}$ 及 $\delta_{\varphi_1} =$

$\delta_{\varphi_2} = 1.5 \mu\text{rad}$ 代入(20)式和(22)式,可得空间点的指向精度分布,如图4所示。由图4可知,在跟踪范围 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 内, x 、 y 方向和联合坐标精度服从相同的分布,且精度基本相同,即中心区域的精度高,而越靠近边缘,指向精度越低,这与图3所讨论的结果一致。最终的指向精度在 $0.30 \sim 0.35 \text{ mm}$ 范围内,对应的角度精度为 $0.62'' \sim 0.72''$ 。

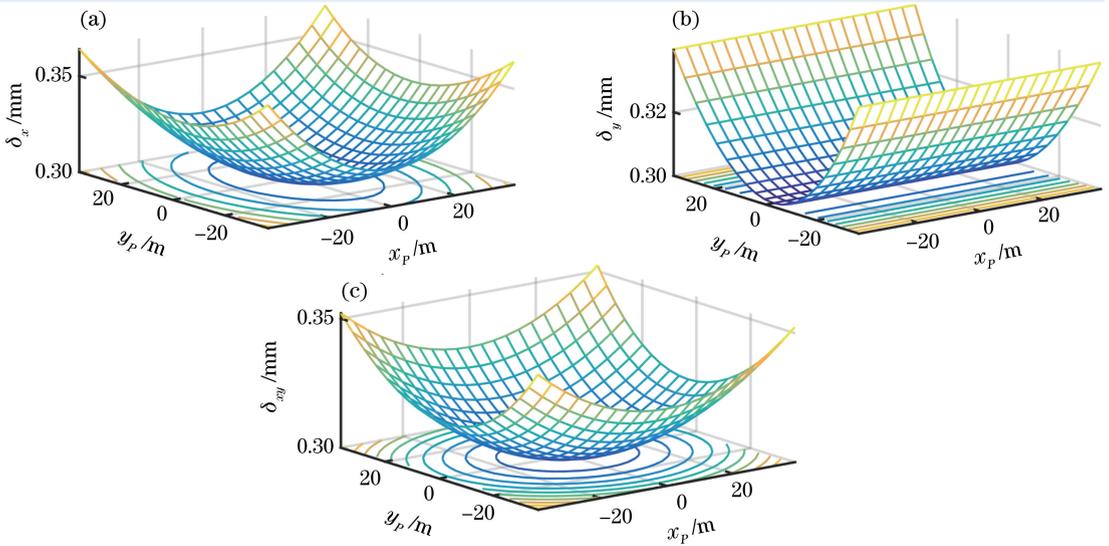


图4 $b = 100 \text{ m}$ 时的坐标指向精度分布。(a) δ_x ; (b) δ_y ; (c) δ_{xy}

Fig. 4 Point position accuracy when $b = 100 \text{ m}$. (a) δ_x ; (b) δ_y ; (c) δ_{xy}

为了研究测距仪的测距精度对最终空间坐标指向精度的影响,引入时间参量,测距仪的测距精度由时间不确定度来决定。当前测距精度为 0.1 mm ,计时精度为 $\delta_t = 3.33 \times 10^{-13} \text{ s}$ 。假定角度转动服从正态分布,且角度转动精度 $\delta_{\varphi_1} = \delta_{\varphi_2} = 1.5 \mu\text{rad}$,时间测量也服从正态分布,且计时精度 $\delta_t = 3.33 \times 10^{-13} \text{ s}$,利用(21)式计算扫描点在空间的误差分布^[12]。计算过程如下:首先在特定的转角 φ_1 、 φ_2 和传播时间 t 处,计算真实的位置 (x_P, y_P, z_P) 。考虑到 φ_1 、 φ_2 和 t 服从正态分布,不确定度为该变量的标准差,进行 10000 次仿真测试,得到不同的随机扫描位置 (x_P, y_P, z_P) ,对应 3 组 10000 维的列向量,将其组合成 10000×3 型矩阵,然后求出该矩阵的 3×3 型协方差矩阵,协方差矩阵对应的本征值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 反映了 3 个坐标值 x_P 、 y_P 、 z_P 的误差范围,对应的单位本征向量表示误差椭球 3 个轴的方向。如果定义置信度为 95% 的置信区间,则所求误差椭球 3 个轴的半轴长分别为 $\sqrt{5.991\lambda_1}$ 、 $\sqrt{5.991\lambda_2}$ 、 $\sqrt{5.991\lambda_3}$,其中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为协方差矩阵对应的本征值,轴的取向为对应的本征向量代表的方向。

根据求得的 3 个半轴长和方向向量,即可确定误差椭球,亦即跟踪系统扫描的空间坐标误差范围。图 5(a)所示为 $b = 100 \text{ m}$ 处,当 $\varphi_1 = -8^\circ$ 、 $\varphi_2 = -5^\circ$ 、 $d_1 = 0.05 \text{ m}$ 、角度转动精度为 $1.5 \mu\text{rad}$ 时的误差椭球(置信区间的置信度为 95%)。此时,扫描点落在该椭球内的概率为 95%。图 5(b)所示为在不同测量距离处,测距仪引起的误差以及二维振镜转角引起的误差占总位置指向误差的百分数。由图 5(b)可知,随着测量距离增大,测距仪计时精度引起的指向误差为次要因素,而二维振镜转动角不确定度引起的误差为主要因素。

为了更清楚地研究指向精度与二维振镜角度转动精度、测距仪计时精度(测距精度)的关系,在不同的转动角下,仿真计算二维振镜指向误差随跟踪距离的变化情况,对应的误差椭球分布如图 6(a)所示。其中, φ_1 分别取 $\pm 8^\circ$, φ_2 分别取 -5° 、 0° 、 5° ,测距仪测量往返时间分别取 7, 14, 28, 56 ns。此外,在不同的转角下,由测距仪引起的二维振镜相对指向误差随距离的变化如图 6(b)所示。由图 6(b)可知,近距离扫描跟踪时,由测距仪的测距精度引起的跟踪系统指向误差占比较大,而随着扫描跟踪距离增

加,测距仪测距精度引起的跟踪系统指向误差的占比越来越小,此时二维振镜角度精度逐渐起主导作用。

在不同转动角时,均有该规律出现,这为提高跟踪系统的跟踪精度提供了依据。

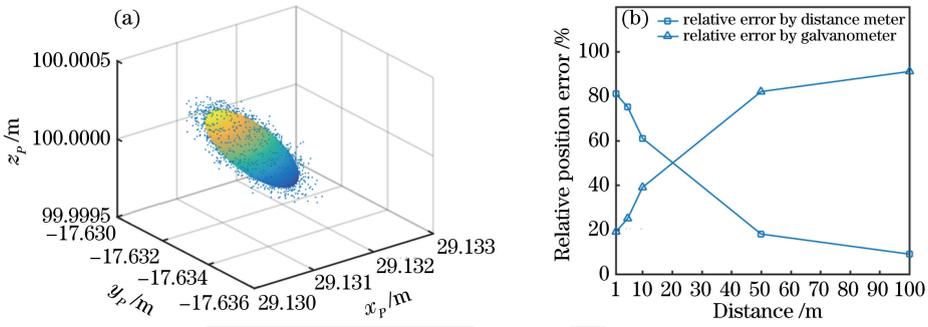


图 5 $\varphi_1 = -8^\circ, \varphi_2 = -5^\circ, d_1 = 0.05 \text{ m}, b = 100 \text{ m}, \delta_{\varphi_1} = \delta_{\varphi_2} = 1.5 \mu\text{rad}$ 时的误差分析。

(a) 误差椭球分布; (b) 跟踪系统的相对指向误差

Fig. 5 Error analysis when $\varphi_1 = -8^\circ, \varphi_2 = -5^\circ, d_1 = 0.05 \text{ m}, b = 100 \text{ m},$ and $\delta_{\varphi_1} = \delta_{\varphi_2} = 1.5 \mu\text{rad}$.

(a) Error ellipsoid; (b) relative position error of tracking system

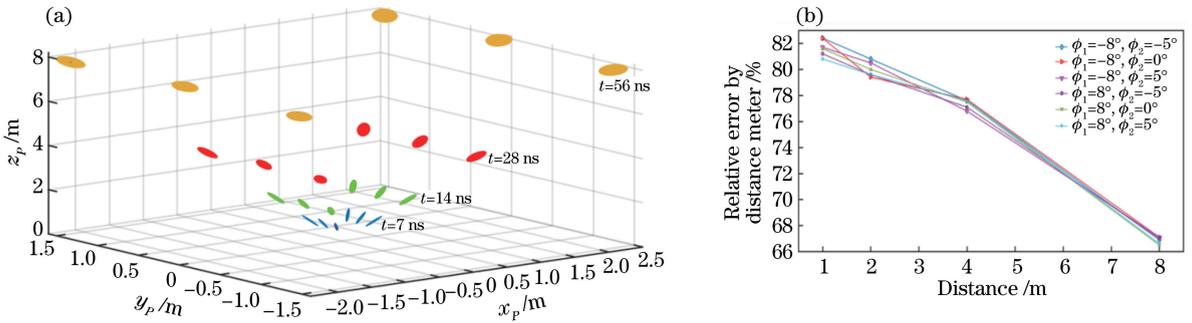


图 6 指向误差分析。(a) 误差椭球分布; (b) 不同转角时测距仪引起的相对指向误差随距离的变化

Fig. 6 Position error analysis. (a) Error ellipsoids; (b) relative position error caused by distance meter as a function of distance at different rotation angles

4.2.2 速度分析

跟踪系统的跟踪速度受二维振镜扫描范围、扫描步长和扫描响应时间的限制。在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ (即 $-0.435 \sim 0.435 \text{ rad}$) 最大扫描范围内, 现有二维振镜的响应时间为 18 ms , 在小角度 1% 量程内 (0.5°), 响应时间为 1.2 ms 。假定跟踪系统数据处理、反馈电路响应时间与二维振镜响应时间均为 1.2 ms , 且在跟踪范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的跟踪过程中, 二维振镜以最大的速度匀速扫描, 则最大跟踪速度满足 $\omega_{\max} < \frac{0.5^\circ}{1.2 \text{ ms} + 1.2 \text{ ms}} = 208 \text{ (}^\circ\text{)/s} = 3.6 \text{ rad/s}$ 。

5 结 论

提出了一种基于二维振镜与 PSD 的高精度激光主动跟踪技术。结合目前亚角秒量级角位移跟踪精度的二维振镜、亚毫米量级测距精度的测距仪, 以及微米量级位移探测精度的 PSD 来实现闭环反馈

控制, 设计了激光主动跟踪测量系统。建立了基于二维振镜的激光跟踪光路系统模型, 利用矢量分析的方法对激光跟踪系统进行光线追踪, 对激光跟踪系统的指向精度进行了数值仿真, 对系统进行了误差分析。结果表明: 在远距离跟踪中, 二维振镜的角度转动误差是引起跟踪位置误差的主要因素; 在近距离跟踪时, 测距仪的测距精度是引起跟踪位置误差的主要因素。特别地, 在跟踪距离为 100 m 处, 跟踪系统的指向精度可达 0.35 mm , 航向角和俯仰角误差为 $0.72''$, 跟踪范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 最大跟踪速度可达 3.6 rad/s , 能够实现对远距离快速运动目标的高精度主动跟踪。

参 考 文 献

[1] Bradshaw M J, Gao Y, Homewood K. Performance modelling of the fine lateral and longitudinal sensor (FLLS) for ESA's PROBA-3 mission [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10743: 107430H.

- [2] Lu R S, Li W H, Lao D B, *et al.* Angular error compensation for laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2299-2305.
卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2299-2305.
- [3] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0104003.
陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0104003.
- [4] Zhe W J, Gao L M, Yang Y Q, *et al.* Calibration and compensation of angular error in laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(Z1): 52-56.
折文集, 高立民, 杨永清, 等. 激光跟踪仪测角误差标定及补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(Z1): 52-56.
- [5] Zhang W Y, Lao D B, Zhou W H, *et al.* Self-calibration method based on multi-head reading layout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0812001.
张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0812001.
- [6] Chen L, Zhang D W, Zhou Y L, *et al.* Design of a high-precision and non-contact dynamic angular displacement measurement with dual-laser Doppler vibrometers [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9094.
- [7] Feng B, Shi Y Y, Wu Y X, *et al.* Research on synchronized tracking system based on rotating mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 600-604.
冯斌, 史元元, 武耀霞, 等. 基于转镜同步跟踪系统的研究 [J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 600-604.
- [8] Zhao H X, Tian L D, Zhao J K, *et al.* Analysis of attitude measurement accuracy and indoor evaluation method of photoelectric theodolite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112004.
赵怀学, 田留德, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度分析及室内评价方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0112004.
- [9] Chen Z B, Fan L, Xiao W J, *et al.* Directional error analysis of 2D galvanometer scanning system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(2): 180-186.
陈志斌, 范磊, 肖文健, 等. 二维振镜扫描系统调向误差分析 [J]. *应用光学*, 2018, 39(2): 180-186.
- [10] Cheng X Y, Wang H H, Li N, *et al.* A method of measuring beam scans function [J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(4): 211-213.
成向阳, 王海虹, 李宁, 等. 光束扫描检测法及二维快速激光扫描系统 [J]. *激光与红外*, 2000, 30(4): 211-213.
- [11] Qu Y. Key technologies of high precision and low cost galvanometer scanning laser 3D vision system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
曲杨. 高精度低成本激光振镜扫描 3D 视觉系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [12] Zhang J Y, Fan T Q, Cao X D. Dynamic photoelectric autocollimator based on two-dimension position sensitive detector [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6723: 672315.
- [13] Pokorny P. One-mirror and two-mirror three-dimensional optical scanners: position and accuracy of laser beam spot [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2730-2740.
- [14] Han W P, Meng W, Li Y X, *et al.* Error analysis and correction methods of dual galvanometer scanning [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(4): 14-18.
韩万鹏, 蒙文, 李云霞, 等. 双振镜激光扫描的误差分析及校正方法 [J]. *光电技术应用*, 2011, 26(4): 14-18.