

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311425

面向激光跟踪仪跟踪恢复的伺服运动角度计算方法

邱启帆^{1,2}, 王 博², 张 佳², 董登峰², 周维虎^{1,2}

(1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106; 2. 中国科学院微电子研究所 北京 100029)

摘 要:为了解决激光跟踪仪跟踪恢复过程中快速精确的获取伺服运动角度问题,提出了一种面向激光跟踪仪跟踪恢复的伺服运动角度计算方法。首先阐述了基于主动红外探测的激光跟踪仪跟踪恢复原理与合作目标靶球视觉目标检测特点,并分析了跟踪恢复过程中光轴视轴非共轴不平行问题所导致的伺服运动角度非线性变化问题;其次,构建了目标距离、目标像素偏差值与伺服运动角度关系的计算模型,完成了基于整定数据的模型参数整定;最后,开展了验证实验并进行了精度分析。实验结果表明,计算模型得到的跟踪恢复角度与实际跟踪恢复角度差值不大于 0.0077° ,最大偏移距离误差小于2 mm,满足激光跟踪仪跟踪恢复的应用要求。

关键词: 目标捕获;激光跟踪;跟踪恢复

中图分类号: TH744.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Calculation method of servo motion angle for laser tracker tracking recovery

Qiu Qifan^{1,2}, Wang Bo², Zhang Jia², Dong Dengfeng², Zhou Weihu^{1,2}

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Institute of Microelectronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To solve the problem of obtaining the servo motion angle quickly and accurately in the process of tracking recovery of laser tracker, this article proposes a calculation method of servo motion angle for tracking recovery of laser tracker. Firstly, the principle of tracking recovery of laser tracker based on active infrared detection and the characteristics of visual target detection of cooperative target are expounded, and the problem of nonlinear change of servo motion angle caused by the non-coaxis and non-parallel problem of optical axis and visual axis in the tracking recovery process is analyzed. Secondly, the calculation model of the relationship among the target distance, the target pixel deviation value and the servo motion angle is formulated, and the model parameter tuning based on the tuning data is completed. Finally, the verification experiment and the accuracy analysis are carried out. The results show that the difference between the tracking recovery angle obtained by the calculation model and the actual tracking recovery angle is not more than 0.0077° , and the maximum offset distance error is less than 2 mm, which meet the application requirements of laser tracker tracking recovery.

Keywords: target capture; laser tracking; track recovery

0 引 言

在飞机、船舶、航天器、风电等高端装备的大尺寸零部件加工、装配和校准现场,激光跟踪仪是获取待测目标外形尺寸和形位公差等空间几何数据的常用精密测量仪器^[1-2]。凭借其快速高精度的优势,激光跟踪仪更是在航天器编队一体化控制、空间目标对接、机器人位姿在线实

时校准^[3-7]、多自由度姿态动态跟踪测量^[8-10]等新技术领域得到了广泛的应用。

激光跟踪仪以激光跟踪作为测量基础,在现场使用时若出现遮挡或其他操作不当的因素产生断光,则会导致合作目标靶球的丢失、系统跟踪中断和测量停止。由于其使用场景测量范围较大,一般为几米到几十米,且测量对象结构复杂,在操作过程中不可避免的存在断光的情况,理论上此时可通过人工对准的方式重新恢复跟踪,

但由于跟踪传感器的激光敏感面较小,在实际操作过程中要求操作人员在保持合作靶球高度稳定的条件下实现激光的精确对准,操作难度大,难以实现快速的跟踪恢复。此外,将合作目标靶球返回至激光跟踪仪的初始点重新开始测量也是一种恢复测量的手段,但其进一步消耗了操作时间,极大的降低了工作效率。因此,亟待一种实现合作目标靶球的自动捕获并恢复跟踪的方法以提高激光跟踪仪工作效率。针对这一问题,国内外开展了很多相关研究,Nguyen 等^[11]提出了一种基于阿基米德螺旋线进行目标搜索的方法,该方法搜索范围大,靶标定位速度慢,实时性差,而且可能无法找到运动目标。魏振忠^[12]设计了一种独立的单目视觉引导系统,用于计算靶球在该系统坐标系下的三维坐标,并引导单台激光跟踪仪实现跟踪恢复与自动测量,该方法大幅缩小了搜索范围,并提高了跟踪仪的定位速度及测量效率,但该系统独立于激光跟踪仪系统,每次使用前需要进行复杂的坐标系转换标定。周虎等^[13]和吴斌等^[14]设计了一套独立外置的视觉系统,用于引导激光经纬仪对准目标进行自动测量方法,其测量目标多为反射片,重点攻克了空间坐标转换与系统标定并实现了激光的自动对准。Shao 等^[15]重点研究了目标在视觉引导坐标系与跟踪仪坐标系的标定方法以及转换关系,但该方法在光照环境变化剧烈的复杂情况下应用不佳。王博等^[16]提出了一种基于主动红外视觉探测的目标捕获和跟踪恢复方法,该方法利用大发散角红外 SLED 作为主动光源,通过大视场红外相机获得的合作目标靶球对主动光源的反光图像进行靶球识别,进而完成大范围的靶球搜索和定位,并根据该结果驱动伺服电机进行跟踪恢复。该方法设备简单,适配应用场景多,对操作员友好,但因其跟踪恢复角度计算模型简单,在使用中受实际物理模型的影响,跟踪恢复伺服角度存在较大误差,进而需要更多的时间进行多次跟踪恢复角度驱动以完成跟踪恢复,弱化了靶球快速准确识别的优势。

本文针对基于主动红外探测的激光跟踪仪跟踪恢复引导过程中伺服运动角度获取不精确、跟踪恢复引导过程长、恢复速度慢的问题,提出了一种精确的跟踪恢复伺服运动角度整定方法,首先阐述了基于主动红外探测的激光跟踪恢复原理与特点。然后分析了光轴与视轴不共轴问题,建立了靶球的像素坐标、靶球距离和偏移距离的映射模型,设计了激光跟踪时靶球的像素坐标-靶球距离模型参数整定方法。接着,基于像素坐标、跟踪距离和偏移距离的关系模型,建立了基于像素坐标与靶球距离的跟踪恢复角度模型,设计了该模型的参数整定方法和实验装置进行验证,实验结果表明,本文提出的模型符合实际情况,可用于目标丢失后的快速目标捕获恢复跟踪角度计算。

1 基于主动红外探测的跟踪恢复

激光跟踪仪使用位置敏感传感器(position sensitive detector, PSD)作为脱靶量探测器件实现激光跟踪,如图1所示,干涉测距仪、脱靶量探测器、捕获相机和LED均固联在二轴转台内。在跟踪测量状态下,激光跟踪仪使用干涉测距仪的测量光作为跟踪光打向合作目标靶球。经过合作目标靶球反射后的光平行入射光返回,经过分光镜后一部分作为测量臂进入干涉测距仪;另一部分打向PSD并在其表面形成返回光斑,进而激光跟踪仪的跟踪控制系统根据该光斑在PSD上的坐标,驱动二维转台转动一定角度,使返回光斑在脱靶量探测器上的坐标运动到预先整定好的跟踪零点,实现激光跟踪。PSD器件光敏面位大小为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,在该范围内PSD可以输出激光偏差量的探测值;为满足全方向可跟踪,须在设计和组装激光跟踪仪时,通过光机结构将激光跟踪零点调整至PSD坐标中心(0,0),进而保证伺服控制系统根据PSD的激光脱靶量信息实现有效的激光跟踪测量。因此在实际跟踪测量状态下,激光跟踪仪所允许的激光返回光斑距离PSD中心的偏移范围不可超过 $\pm 5\text{ mm}$ ^[17]。

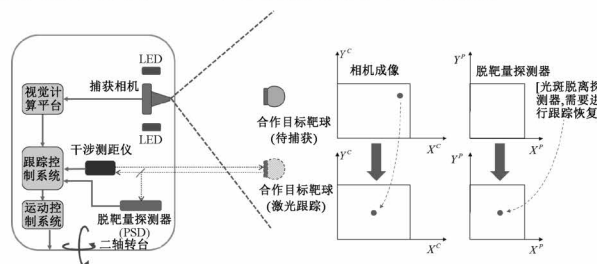


图1 基于主动红外视觉探测的跟踪恢复示意图

Fig.1 Schematic diagram of tracking recovery based on active infrared visual detection

在此条件下,当发生合作目标丢失、系统跟踪中断测量停止时,激光跟踪仪跟踪恢复的直接目标是获取丢失靶球的相关空间信息,通过特定的转换关系,计算得到伺服控制系统所需要的运动角度 γ ,带动测量激光主动对准合作目标靶球,使返回光斑距离PSD中心的偏移距离不超过 $\pm 5\text{ mm}$,使系统重新恢复到激光跟踪状态,即完成一次跟踪恢复。在这一过程中,通过目标的相关空间信息获取伺服运动值这一换算关系,是实现激光跟踪仪跟踪恢复的关键要素之一。

本文基于主动红外视觉探测的目标捕获系统(图1)进行研究,系统通过捕获相机与LED获取空间目标靶球的图像数据,将跟踪中断后靶球在所成图像中的坐标值与正常跟踪时靶球在所成图像中的坐标值进行对比,并据此信息驱动二轴转台运动,使靶球在捕获相机中成像

的位置移动到正常激光跟踪时靶球在捕获相机中成像的位置。此时测量激光也同步对准了目标靶球,实现反射光斑的偏移距离不超过 ± 5 mm这一要求,进而使激光跟踪系统重新启动工作,完成跟踪恢复。为了便于后文描述,定义“像素坐标”为靶球在捕获相机成像探测器上的坐标 (u, v) ,定义“像素原点”为正常激光跟踪时的像素坐标 (u_0, v_0) 。

由于合作目标靶球由3个相互正交的反射表面组成,具有体积小、圆度高、反射率高且外形简单的特点,在强光照射下会在相机视场中形成一个高亮度的圆形目标,如图2所示。基于这一特性,主动红外探测系统可在获取兴趣目标成像信息的同时滤除可见光波段下的复杂背景等干扰,提高系统的可靠快速的目标检测能力,实现合作目标像素坐标的精准提取。

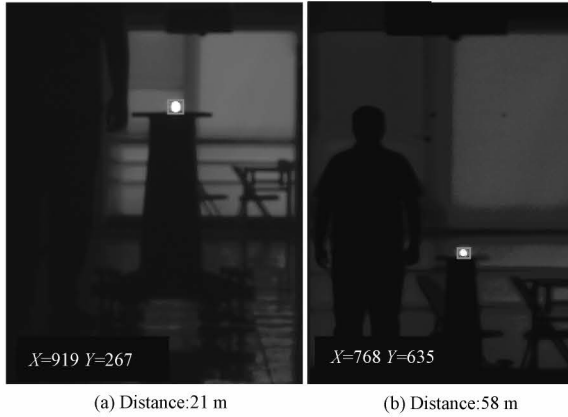


图2 靶球在主动红外视觉探测系统下的成像

Fig. 2 Imaging of target ball in the active infrared vision detection system

2 跟踪恢复中光轴与视轴不共轴问题的模型建立

目标捕获相机与激光跟踪测量系统均安装在二维转台(图1)中,受光学系统结构和仪器整机尺寸重量限制,测量激光光轴与目标捕获相机视轴必然是非共轴且不平行关系,该问题直接影响了跟踪恢复伺服运动角度的精确计算。为了便于分析,本文仅讨论单个方向上的情形,另一方向可参考讨论。

2.1 坐标系定义

定义激光坐标系 C^T ,原点位于激光跟踪仪光心 O^T , X^T 轴指向激光跟踪仪左侧, Z^T 轴为测距激光所在轴线, Y^T 轴满足右手定理,如图3所示。定义目标捕获相机坐标系 C^C ,原点位于相机镜头的光心 O^C ,视轴为 Z^C 轴,理想情况下各轴均与激光坐标系 C^T 各轴平行且同向。定义角 α 为 Z^T 轴在 $X^C - O^C - Z^C$ 面的投影与 Z^C 轴的夹角,可认为其代表了测量激光光轴与相机视轴在水平面方向

上的夹角,理想情况下 $\alpha = 0$;但在实际情况中受加工与装配工艺等复杂因素影响,光轴与视轴之间的夹角难以完全消除,即 $\alpha \neq 0$ ^[18]。

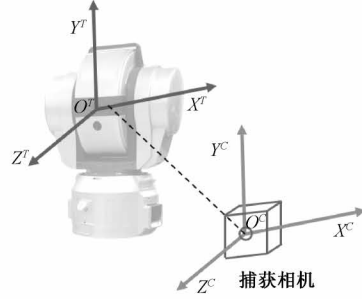


图3 坐标系定义

Fig. 3 Definition of the coordinate system

2.2 非线性模型

认为相机光心由激光跟踪仪光心平移得到,为了便于讨论,本文仅分析 $X^C - O^C - Z^C$ 面与 $X^T - O^T - Z^T$ 面重合时 X 方向的情形,如图4所示。定义 l 表示靶球在 Z^T 轴投影的坐标,即跟踪距离。当发生目标丢失跟踪中断时,认为靶球位于 Z^C 轴上距离 l 处沿平行 X^T 轴方向时的未知偏离距离为 e ,由此可知为了实现跟踪恢复,伺服运动角度值 γ 大小为:

$$\gamma = \left| \arctan \frac{e}{l} \right| \quad (1)$$

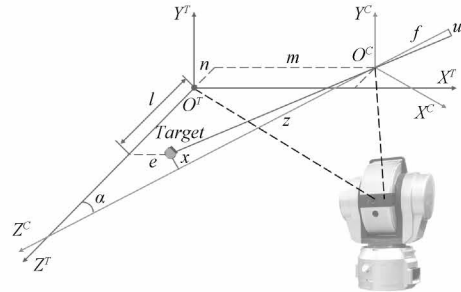


图4 光轴与视轴不共轴问题的几何表示

Fig. 4 Geometric representation for non-coaxial problem of optical axis and visual axis

其中, x 表示靶球平行于 X^C 轴方向的位移, l 表示跟踪距离, z 表示相机小孔成像模型的物距, u 表示像素在 X^C 轴方向的坐标, f 表示相机的焦距, m 表示 O^T 与 O^C 在 X^C 方向的距离,其代表了测量激光中心与相机成像中心在 X 方向上的距离值, n 表示 O^T 与 O^C 在 Z^C 方向的距离,测量激光中心与相机成像中心在 Z 方向上的距离值,有:

$$x = (m - e) \cos \alpha - n \sin \alpha - l \sin \alpha \quad (2)$$

$$z = \frac{(m - e) - x \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (3)$$

在相机坐标系下,结合相机的弱透视模型和小孔成像模型,建立空间距离与图像像素之间的计算关系,设 X 方向的放大倍数为 k_x ,平移像素为 c_x ,在相机成像探测器上的 X 方向坐标为 u ,有:

$$u = k_x f \frac{x}{z} + c_x \quad (4)$$

将式(2)和(3)代入式(4),消除变量 x 和 z ,有:

$$u = k_x f \frac{(m-e) \cos \alpha - n \sin \alpha - l \sin \alpha}{((m-e) - x \cos \alpha) / \sin \alpha} + c_x \quad (5)$$

利用三角函数关系将其整理为:

$$u = -\frac{k_x f}{\cos^2 \alpha} \cdot \frac{(m-e)}{(m-e) \tan \alpha + n + l} + c_x + k_x f \tan \alpha \quad (6)$$

像素坐标距离和偏移距离的非线性关系如图 5 所示,结合式(1)与(6)可以看出,当测量激光的光轴与目标捕获相机的视轴非共轴时,两个坐标系之间的夹角 α 和偏移距离 m, n 的存在将导致图像中目标的像素坐标 u 、目标距离 l 、目标未知偏移距离 e 之间呈现复杂的非线性计算关系,直接影响了跟踪恢复伺服运动角度 γ 的精确计算。

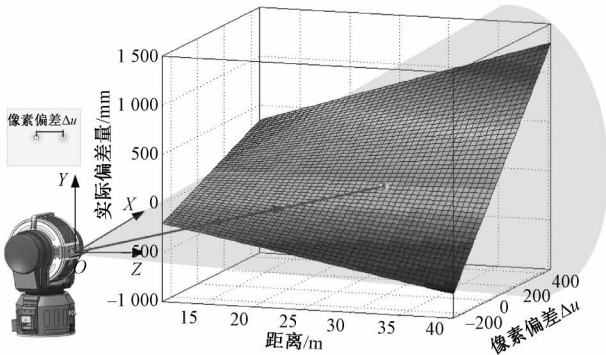


图 5 像素坐标、距离和偏移距离的非线性关系

Fig. 5 Nonlinear relationship between pixel coordinates, distance, and offset distance

2.3 非线性模型优化

1) 像素原点计算模型

在激光跟踪时,可认为目标的偏移量 $e=0$,即像素原点 u_0 是一个关于距离 l 的函数。根据式(6),令 $e=0$,有:

$$u_0 = -\frac{k_x f}{\cos^2 \alpha} \cdot \frac{m}{m \tan \alpha + n + l} + c_x + k_x f \tan \alpha \quad (7)$$

考虑到对于已完成集成装配的确定仪器, $k_x f, m, n, c_x$ 和 α 为与相机、光学镜头、光机结构有关的系统固有参数,均为常数,于是将式(7)简化成:

$$u_0 = F_0(l) = \frac{T_0}{T_1 + l} + T_2 \quad (8)$$

其中,

$$T_0 = -\frac{k_x f m}{\cos^2 \alpha} \quad (9)$$

$$T_1 = m \tan \alpha + n \quad (10)$$

$$T_2 = c_x + k_x f \tan \alpha \quad (11)$$

则 $T_i (i=0,1,2)$ 为式(8) 像素原点模型的待整定参数。

2) 偏移距离计算模型

当进行跟踪恢复时,像素坐标值与像素原点之间的偏差应逐渐趋于 0,结合式(6)和(7),对像素坐标偏差进行分析,有:

$$\Delta u = u - u_0 = -\frac{k_x f}{\cos^2 \alpha} \left[\frac{m-e}{(m-e) \tan \alpha + n + l} - \frac{m}{m \tan \alpha + n + l} \right] \quad (12)$$

对式(12)进行整理,得到距离偏移 e 的计算公式模型,即:

$$e = G(l, \Delta u) = \frac{[\cos^2 \alpha (n+l) + m \sin \alpha \cos \alpha] (m \tan \alpha + n + l) \Delta u}{k_x f (n+l) + \sin \alpha \cos \alpha (m \tan \alpha + n + l) \Delta u} \quad (13)$$

同样的,参数 $k_x f, m, n, c_x$ 和 α 为系统固有参数。

定义:

$$S_0 = \alpha \quad (14)$$

$$S_1 = n \quad (15)$$

$$S_2 = m \quad (16)$$

$$S_3 = k_x f \quad (17)$$

于是将式(13)改写为:

$$e = G(l, \Delta u) = \frac{[\cos^2 S_0 (S_1 + l) + S_2 \sin S_0 \cos S_0] (S_2 \tan S_0 + S_1 + l) \Delta u}{S_3 (S_1 + l) + \sin S_0 \cos S_0 (S_2 \tan S_0 + S_1 + l) \Delta u} \quad (18)$$

定义式(18)为距离偏移的计算模型, $S_i (i=0,1,2)$,

3) 为该模型的待整定参数。

3 参数整定实验与验证

本文使用团队自行研发的 LT6D 型六自由度高精度激光跟踪仪开展参数整定实验与验证。

3.1 像素原点模型的参数整定

1) 像素原点模型参数整定数据的获取

由于像素原点模型将像素原点视作关于跟踪距离的函数,所以需要在跟踪状态下同步记录不同跟踪距离 l 和该距离下的像素坐标 u ,此时的像素坐标 u 即认为是像素原点 u_0 。如图 6 所示,目标靶球从初始跟踪点(home 点)出发,在逐渐向远离跟踪仪的方向移动的过程中,同步记录下 n 个目标靶球距离 l 以及所对应的像素坐标 u ,

并整理为整定数据 $(u_{0,k}, l_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 并根据采集到的 $(u_{0,k}, l_k)$ 数据, 对式(8)中的3个未知参数 T_0 、 T_1 和 T_2 进行像素原点模型参数的整定。

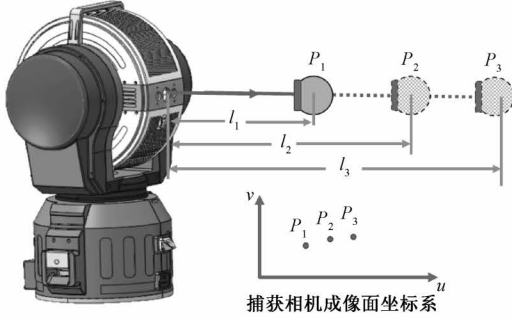


图6 像素原点模型的参数整定实验

Fig. 6 Parameter tuning experiment of the pixel origin model

2) 像素原点模型参数整定结果

为了验证模型的普适性和准确性, 本文针对两台独立的激光跟踪仪开展了像素原点模型的参数整定实验, 并采用统计学方法对实验结果进行评估, 实验结果如表1所示, 其中“起始时跟踪距离”指开始连续采集像素原点 $u_{0,k}$ 时的跟踪距离, “终止时跟踪距离”指结束连续采集像素原点 $u_{0,k}$ 时的跟踪距离。

表1 像素原点模型拟合结果

Table 1 Pixel origin model fitting results

参数	设备1	设备2
起始时跟踪距离/mm	2 999.317 2	1 978.586 6
终止时跟踪距离/mm	35 405.776	35 413.763 2
T_0	-2.672×10^5	-2.654×10^5
T_1	-144.6	-167.5
T_2	1 158	1 158

本文使用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 评价模型参数拟合效果。以设备1为例, 将整定得到的 T_0 、 T_1 以及 T_2 代入式(8), 得到不同跟踪距离 l_k 下的像素原点预测值:

$$\hat{u}_{0,k} = \frac{-267\,200}{-144.6 + l_k} + 1\,158 \quad (19)$$

将预测值 $\hat{u}_{0,k}$ 与实验采集所获得的真值 $u_{0,k}$ 作差, 将差值取平方和后除以样本数并开跟, 计算其均方根误差, 该值越接近0表明参数拟合准确性越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{u}_{0,k} - u_{0,k})^2}{n}} = 0.521\,6 \text{ pixel} \quad (20)$$

由式(20)可得, 设备1所获得的像素原点模型计算式(19)的均方根误差为0.521 6 pixel, 该函数的拟合准确度较高。

同理可以算得设备2的像素原点模型均方根误差为0.444 5 pixel, 模型拟合准确度同样较高, 可满足应用要求。

3.2 跟踪恢复距离偏移模型的参数整定

1) 偏移距离模型参数整定数据的获取

在整定跟踪恢复距离偏移模型参数的某一方面时, 应保证另一方向在激光坐标系下的角度值不变, 一种方法为将均匀间隔排布的靶球固定在一个稳定的可移动平台上, 用于模拟靶球偏移光轴距离。据此搭建的实验装置如图7所示。

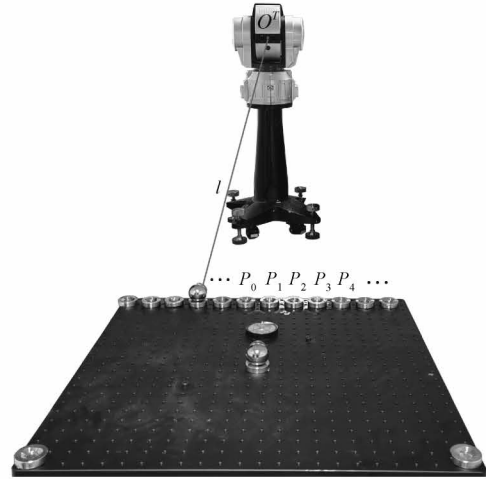


图7 跟踪恢复距离偏移模型的参数整定实验装置

Fig. 7 Parameter tuning experiment device of tracking recovery distance offset model

以 X 方向的参数整定为例, 实验步骤如下。

(1) 将靶球从激光跟踪仪初始跟踪点 (home 点) 跟踪至第 k ($k = 1, 2, \dots, n$) 个距离 l_k 处的点 P_0 , 记录此时的激光跟踪仪方位角 $A_{k,0}$ 以及目标识别像素横坐标 $u_{k,0}$ 。

(2) 将靶球跟踪至点所在 P_0 的、与靶球在 P_0 点时的 Y^T 轴平行的轴上的点 P_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), 即在 P_i 点时, 跟踪仪俯仰角应保持不变。记录此时的激光跟踪仪方位角 $A_{k,i}$ 以及与点 P_0 的距离 $d_{k,i}$ 。

(3) 将激光跟踪仪定位至点 P_0 , 记录靶球在点 P_i 处的像素横坐标 $u_{k,i}$ 。

(4) 重复步骤(1)~(4), 记录不同距离 l_k 下的多组数据。

(5) 整理采集得到的实验数据, 并对式(18)所描述的跟踪恢复距离偏移模型进行参数整定与验证。

2) 偏移距离模型参数整定结果

实验共采集了7个目标距离下所对应的7组偏移距离参数整定数据 $\{A_{k,i}, (u_{k,i}, d_{k,i}, l_{k,i})\}$, 其中采样数据

$A_{k,i}$ 作为真值,用于开展跟踪恢复伺服运动角度计算精度的验证;数据 $(u_{k,i}, d_{k,i}, l_{k,i})$ 用于跟踪恢复距离偏移模型的参数整定。同一台设备在 $l_1 = 10\ 875.70\text{ mm}$ 、 $l_2 = 12\ 700.316\ 8\text{ mm}$ 和 $l_3 = 30\ 674.355\ 2\text{ mm}$ 这3个不同距离下所对应的目标偏移距离 $d_{k,i} (k = 1, 2, 3)$ 与目标像素偏差 $\Delta u_{k,i} = u_{k,i} - u_{k,0} (i = 1, 2, 3 \cdots)$ 的实验数据曲线如图8所示。

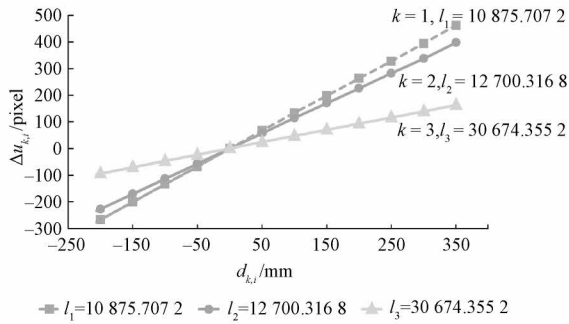


图8 不同工作距离下的偏移距离与像素偏差

Fig.8 Offset distance and pixel offset at different working distances

对数据 $(u_{k,i}, d_{k,i}, l_{k,i})$ 进行相应的整理,并利用其中3组数据进行式(18)的模型参数整定,整定结果如表2所示。其中“起始整定距离”指进行偏移距离模型整定数据有效的最短距离,“终止整定距离”指进行偏移距离模型整定数据有效的最长距离。

表2 跟踪恢复距离偏移模型参数整定结果

Table 2 Fitting results of parameter calibration of the model of distance offset for tracking recovery

名称	数值
起始整定距离/mm	10 875.707 2
终止整定距离/mm	30 674.355 2
S_0	-13.05
S_1	-43.25
S_2	299.9
S_3	13 480

于是偏移距离的预测值为:

$$\hat{d}_{k,i} = \frac{[0.949l_k - 107.012\ 653](-112.762\ 94 + l_k)(u_{k,i} - u_{k,0})}{-583\ 010 + 13\ 480l_k + 0.219\ 968(-112.762\ 94 + l_k)(u_{k,i} - u_{k,0})} \quad (21)$$

RMSE 为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{d}_{k,i} - d_{k,i})^2}{n}} = 1.087\text{ mm} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

计算结果表明,该模型参数整定准确性较好,能够满足使用需要。

3.3 结果分析

根据上述实验,利用7组不同距离的实验数据,验证式(21)。

对实验数据 $\{A_{k,i}, (u_{k,i}, d_{k,i}, l_{k,i})\}$ 进行整理,得到 $\{\Delta A_{k,i}, (u_{k,i}, d_{k,i}, l_{k,i})\}$,其中:

$$\Delta A_{k,i} = A_{k,i} - A_{k,0} \quad (22)$$

式中: $\Delta A_{k,i}$ 为跟踪恢复角度采集到的真值数据。

将式(21)代入式(1)得到跟踪恢复伺服运动角度预测值为:

$$\hat{\gamma}_{k,i} = \arctan \frac{\hat{d}_{k,i}}{l_k} \quad (23)$$

其中, $\hat{\gamma}_{k,i}$ 与实际跟踪恢复角度真值 $\Delta A_{k,i}$ 的差值为:

$$\Delta \gamma_{k,i} = \hat{\gamma}_{k,i} - \Delta A_{k,i} = \hat{\gamma}_{k,i} - (A_{k,i} - A_{k,0}) \quad (24)$$

其中, $\Delta \gamma_{k,i}$ 值越小,表明模型越精确。

根据第1节所述,激光跟踪接管跟踪恢复的要求为PSD坐标范围在 $\pm 5\text{ mm}$ 之内,即不同距离下,跟踪恢复伺服运动角度误差 $\Delta \gamma_{k,i}$ 所折算的偏移距离误差为:

$$\Delta e_{k,i} = l_k \tan \Delta \gamma_{k,i} \quad (25)$$

在PSD对应方向的坐标长度在 $\pm 5\text{ mm}$ 之内,即为一次成功的跟踪恢复。

图9所示为7组实验数据的验证计算结果,为7个不同距离 l_k 下,伺服角度整定误差 $\Delta \gamma_{k,i}$ 所对应的偏移距离误差 $\Delta e_{k,i}$ 。

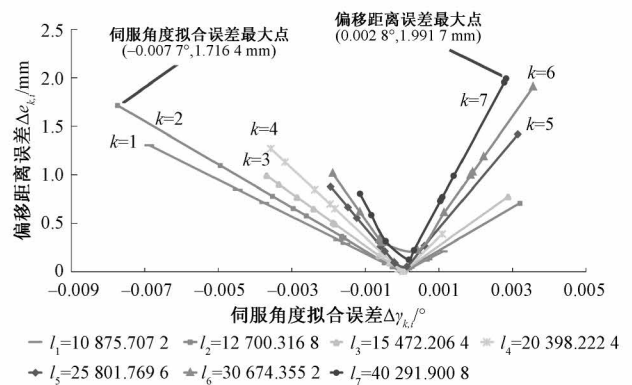


图9 不同距离下伺服角度预测误差和偏移距离误差

Fig.9 Servo angle prediction error and offset distance error at different distances

由图9可知,在验证数据所覆盖的10~40 m的距离范围内,最大跟踪恢复伺服运动角度预测误差为 $-0.007\ 7^\circ$,该值产生于 $l_2 = 12\ 700.316\ 8\text{ mm}$ 处,其所产生的偏移距离误差 $\Delta e_{2,i} = 1.716\ 4\text{ mm}$,满足第1节所述激光跟踪所要求的 $\leq \pm 5\text{ mm}$;同时,最大偏移距离误差为

$\Delta e_{7,i} = 1.9917 \text{ mm}$, 该值产生于 $l_7 = 40\ 291.9008 \text{ mm}$ 距离处, 所对应的角度误差为 0.0027° , 仍旧满足 $\Delta e \leq \pm 5 \text{ mm}$ 条件, 完全满足实际工程应用需求。

4 结 论

本文面向基于视觉的激光测量目标快速跟踪恢复需求, 深度剖析了激光光轴与相机视轴不共轴带来的问题, 构建了像素坐标、像素原点和跟踪距离与偏移距离的计算关系模型, 提出了跟踪恢复伺服运动角度精确计算方法, 并以 X 轴方向为例, 详细介绍了针对像素原点模型与跟踪恢复角度模型的优化方法, 设计了模型参数快速整定方法并开展了相关验证实验。

实验结果表明, 本文提出的跟踪恢复伺服运动角度计算模型精度高, 在 $10 \sim 40 \text{ m}$ 范围内单次计算产生的偏移距离误差小于 1.9917 mm (对应目标距离为 $40\ 291.9008 \text{ mm}$), 满足激光跟踪系统返回光斑偏差距离小于 $\pm 5 \text{ mm}$ 的精度要求。此外本文设计的参数整定方法工作量小, 无需其他复杂测试仪器参与, 应用价值高, 可用于实现快速高效的激光跟踪仪跟踪恢复。

参考文献

- [1] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, et al. Optoelectronic aiming and positioning system for laser trackers[J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23(6): 1558-1564.
- [2] 侯宝芬. 6D 精密激光跟踪测量技术的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.
HOU B F. 6D Research on precision laser tracking measurement technology[D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery), 2012.
- [3] 江文松, 李旋, 罗哉, 等. 六自由度机械臂参数校准不确定度评定方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 26-34.
JIANG W S, LI X, LUO Z, et al. Evaluation method for uncertainty of parameter calibration of six degrees of freedom manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 26-34.
- [4] 周培松, 周维虎, 董登峰, 等. 国产激光跟踪仪在工业机器人校准中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2022(17): 1-4.
ZHOU P S, ZHOU W H, DONG D F, et al. Application of domestic laser trackers in industrial robot calibration[J]. China New Technology and New Products, 2022(17): 1-4.
- [5] 黄雷, 窦艳红, 樊宇, 等. 基于激光跟踪关节臂的机器人位姿测量系统研制[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 26-31.
HUANG L, DOU Y H, FAN Y, et al. Development of a robot pose measurement system based on laser tracking joint arm[J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(1): 26-31.
- [6] 杭强, 施威涛. 基于激光跟踪仪的机器人性能测量与分析[J]. 中国计量, 2019(1): 117-118.
HANG Q, SHI W T. Performance measurement and analysis of robots based on laser trackers[J]. China Metrology, 2019(1): 117-118.
- [7] 张艳菊, 符远翔, 车丹. 激光跟踪仪在工业机器人位姿特性检测中的应用[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 29-33, 14.
ZHANG Y J, FU Y X, CHE D. Application of laser tracker in the detection of pose characteristics of industrial robots[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2018, 46(21): 29-33, 14.
- [8] 王欣宇, 范百兴, 潘廷耀, 等. 目标动态位姿激光跟踪测量方法研究[J]. 测绘通报, 2016(S2): 207-210, 221.
WANG X Y, FAN B X, PAN T Y, et al. Research on laser tracking measurement method for dynamic pose of targets[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2016(S2): 207-210, 221.
- [9] 于文波. 六自由度测量中的二维检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
YU W B. Research on key technologies of two-dimensional detection in six degrees of freedom measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
GAO Y. Research on six degrees of freedom measurement technology for large precision engineering[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [11] NGUYEN T T, AMTHOR A, SPRINGER M, et al. Nonlinear modelling and identification of a high precision laser tracking system[C]. International Conference on Control, Automation and Information Science, 2012.
- [12] 魏振忠, 孙文, 张广军, 等. 激光跟踪视觉导引测量中靶标球球心定位方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 929-935.
WEI ZH ZH, SUN W, ZHANG G J, et al. Method for locating the center of the target ball in laser tracking

- visual guidance measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (4): 929-935.
- [13] 周虎, 郝继贵, 张滋黎, 等. 激光电子经纬仪动态跟踪引导系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2671-2678.
- ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, et al. Design of a dynamic tracking and guidance system for laser electronic theodolites [J]. Optical Precision Engineering, 2011, 19 (11): 2671-2678.
- [14] 吴斌, 苏晓越. 一种视觉引导经纬仪自动测量中精确引导方法[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 453-457.
- WU B, SU X Y. A precise guidance method for visual guided theodolite automatic measurement [J]. Laser Technology, 2015, 39 (4): 453-457.
- [15] SHAO M W, WEI Z Z, HU M J, et al. Calibration method for a vision guiding-based laser-tracking measurement system [J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(8): 085009-1-085009-13.
- [16] 王博, 董登峰, 高兴华, 等. 基于主动红外视觉探测的激光跟踪仪目标跟踪恢复方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 84-92.
- WANG B, DONG D F, GAO X H, et al. Laser tracker target tracking recovery method based on active infrared visual detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50 (4): 84-92.
- [17] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 309-318.
- DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, et al. Design of a precision tracking system for laser trackers [J]. Optical Precision Engineering, 2016, 24 (2): 309-318.
- [18] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 20-30.

ZHANG H J, MA J J, ZHANG J. Laser tracker parameter error model and calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (9): 20-30.

作者简介



邱启帆, 2020 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为光学精密测量及自动控制。

E-mail: qiuqifan@nuaa.edu.cn

Qiu Qifan received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include optical precision measurement and automatic control.



王博(通信作者), 2009 年于北京信息科技大学获得学士学位, 2013 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2021 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院微电子研究所助理研究员, 博士后。主要研究方向为伺服跟踪控制系统、图像处理、目标识别。

E-mail: wangbo2019@ime.ac.cn

Wang Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2009, M. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2013, and Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2021. He is currently an assistant researcher and a postdoctoral fellow at Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include servo tracking control system, image processing and target recognition.