

应用分块三次多项式的导引头测角精度标定

袁东明^{1,2,3}, 丁亚林¹, 张健^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为减小和消除零件机械加工、装调及传感器误差等对某激光捷联导引头测角精度的影响,提出应用分块三次多项式的导引头测角误差标定方法。根据各项系统误差特点,同时考虑实验过程中随机误差对标定的影响,采用分块三次多项式分别建立探测器输出俯仰角、偏航角到实际指向矢量俯仰角、偏航角的映射关系,实现了测角误差标定。研究表明:标定后俯仰角和偏航角误差均值分别由原来的 $0.136\ 0^\circ$ 、 $0.336\ 4^\circ$ 降至 $0.004\ 7^\circ$ 、 $0.001\ 5^\circ$,标准差也分别由原来的 $0.382\ 0^\circ$ 、 $0.375\ 2^\circ$ 降至 $0.026\ 9^\circ$ 、 $0.022\ 7^\circ$;该标定方法在导引头工作视场内具有较高的精度和良好的一致性,且避免了构造复杂的数学模型进行参数识别,简便易行,可推广至类似系统的误差标定工作中。

关键词:导引头;分块三次多项式;测角精度;标定

中图分类号: TJ765.3⁺32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2019)10-2042-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.009

Calibration of Seeker Angle-measuring Error with Block Three-order Polynomial

YUAN Dongming^{1,2,3}, DING Yalin¹, ZHANG Jian^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: An angle-measuring error calibration method based on block three-order polynomial is proposed to reduce or eliminate the effects of machining error, assembly and adjustment error, sensor error on the angle-measuring accuracy of a laser seeker. With the consideration on the characteristics of each systematic error and the impact of random error during the experiment on calibration, the mapping relations between the pitch and yaw angles of the detector output and the real pitch and yaw angles of pointing vector are established through the block three-order polynomial for the calibration of angle-measuring error. The research results show that the calibrated means of yaw and pitch angle errors are decreased from $0.136\ 0^\circ$ and $0.336\ 4^\circ$ to $0.004\ 7^\circ$ and $0.001\ 5^\circ$, respectively, and the standard deviations of yaw angle error and pitch angles are reduced from $0.382\ 0^\circ$ and $0.375\ 2^\circ$ to $0.026\ 9^\circ$ and $0.022\ 7^\circ$, respectively. The proposed calibration algorithm has high accuracy and fine consistency in the field of view of seeker, and is easy to be used. A complicated mathematic model needs not to be established for parameter recognition

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 高分专项航空系统项目(30-H32A01-9005-13/15)

作者简介: 袁东明(1988—),男,助理研究员,博士研究生。E-mail: 630464375@qq.com

通信作者: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师。E-mail: dingyl_1964@126.com

when the proposed calibration method is used. Moreover, the method can be used for the error calibration of similar systems.

Keywords: seeker; block three-order polynomial; angle-measuring accuracy; calibration

0 引言

导引头是精确制导系统不可或缺的组成部分,主要功能是完成对目标的搜索、捕获、跟踪与测量^[1-2],作为光电探测系统从应用波段上可分为可见光导引头、红外导引头、激光导引头等;从结构形式上可分为框架式、捷联式。近年来,激光制导武器以其精度高、威力大、抗干扰能力强等优点成为现代精确打击的重要手段之一^[3-4]。

在整机系统工作过程中,激光导引头负责测量载体视线路角,其精度高低直接影响控制系统的稳定性与制导精度,而影响测角精度的主要因素有机械零件加工、装配误差,光学零件加工、装配误差,探测器及后续信号处理电路引起的电学系统误差,除此外,还包括在工作过程中由振动、温度以及电学系统噪声引起的随机误差。从这些因素出发,如何进一步提高导引头测角精度,俨然是一个需要特别关注的问题。过度地提高光机系统加工、装调精度,提高探测器等光电元器件指标,会造成生产周期、成本的大幅上升;与此同时,上述精度指标对于现有技术来说也不切实际。相比之下,通过系统标定的方法提高导引头精度方便灵活,更具可行性^[5-6]。正确的标定方法往往能突破设计极限,使得系统精度获得数量级的提升。目前对系统的标定从原理上可以分为基于参数模型的标定方法和基于非参数模型的标定方法^[7-8]。参数模型标定方法基于精确的数学模型,而非参数模型标定方法可规避数学模型建立的困难,但需要一定量的观测数据。

Huang 等^[9]全面分析了某光电望远镜指向精度的误差因素,并以此建立了运动模型,然后进行线性化,忽略 2 阶及以上小量,最后通过偏最小二乘法进行参数识别,得到了较好的结果,该方法除忽略次要因素的影响外,过程也较为复杂。孙辉等^[10]分析了影响导引头指向精度的误差项,建立了系统运动学方程并对其线性化,提出分步最小二乘法,实现了指向误差的标定。该方法具有较好的标定效果,然而其研究对象为线性光电探测器,并不适合本文的四象限探测器。赵明等^[11-12]和朱明超等^[13]采用局部指数积及最小二乘优化找出最优系统识别参数,但由于初始姿态误差与关节变量误差不能统一到误差

模型中进行辨识,从而限制了该方法的标定精度。陈勇等^[14]推导出四象限探测器测量的实际偏移量和传统算法计算偏移量之间的关系,对探测器的非均匀性进行了定量补偿。该方法很好地消除了探测器误差,但未考虑导引头系统其他误差的影响。此外,上述研究均未考虑随机误差对标定的影响^[15-17]。

本文采用分块三次多项式对某激光捷联导引头测角误差进行标定,规避了因四象限探测器系统误差存在隐式非线性^[14]而造成建模困难的问题,考虑了随机误差对系统误差标定的影响^[15,17],同时保证标定实验数据节点 1 阶导数、2 阶导数的连续性^[16],以提高标定精度。首先,分析影响导引头测角精度的各项误差及特点;其次,给出分块三次多项式标定方法的数学原理;最后,搭建实验测试系统,对所提方法进行验证。实验结果表明:该方法稳定、可靠,具有较高精度,完全满足导引头研制需求,对此类工程问题提供了参考。

1 导引头模型及误差分析

1.1 导引头几何模型与坐标系

本文所研究导引头安装在导弹头部。为了避免框架式导引头中陀螺、编码器及相应轴系引入的误差,本系统采用捷联式导引头。具体结构如图 1 所示,图中 $Ox_b y_b z_b$ 、 $Ox_l y_l z_l$ 、 $Ox_g y_g z_g$ 、 $Ox_d y_d z_d$ 表示理想坐标系。

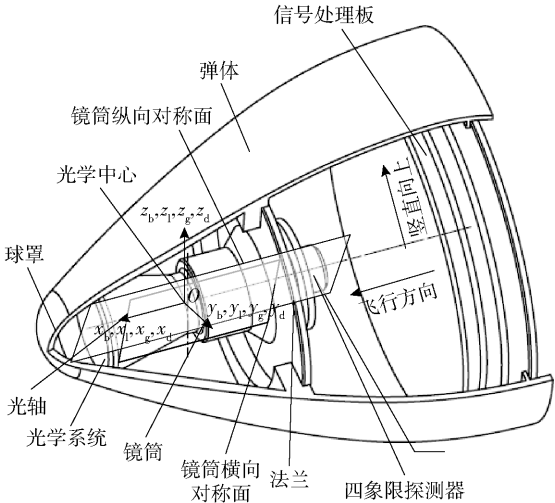


图 1 导引头结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seeker structure

由图 1 可知,该导引头系统由弹体、镜筒、光学系统(含球罩)、四象限探测器及信号处理板等组成。光学系统安装在镜筒内,位置通过光学表面与机械表面配合及内部隔圈、压圈固定;四象限探测器通过自身定位面与定位孔固定在镜筒上;镜筒通过法兰与弹体柱面配合,另加定位销周向定位后固连于弹体上。

为了更好地说明该导引头测角误差来源,在光学中心处建立了 4 个坐标系(见图 1):

1) 弹体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 。该坐标系与弹体固连;坐标原点位于光学中心; Ox_b 轴同飞行方向; Oz_b 轴竖直向上; Oy_b 轴由右手定则确定。

2) 镜筒坐标系 $Ox_l y_l z_l$ 。该坐标系与镜筒固连; Ox_l 轴为镜筒法兰与弹体配合柱面轴线,方向同飞行方向; Oz_l 轴位于镜筒纵向对称面内与 Ox_l 轴垂直,方向竖直朝上; Oy_l 轴由右手定则确定。

3) 光学坐标系 $Ox_g y_g z_g$ 。该坐标系与光学镜片固连; Ox_g 轴为光学系统光轴,方向同飞行方向; Oz_g 轴在光机装调理想位置下与 Oz_l 轴相同; Oy_g 轴由右手定则确定。

4) 探测器坐标系 $Ox_d y_d z_d$ 。该坐标系与探测器固连; Ox_d 轴垂直探测器靶面,方向同飞行方向; Oz_d 轴由探测器周向定位孔确定,理论上与 Oz_g 轴相同; Oy_d 轴由右手定则确定。

上述 4 个坐标系,在导引头装配完毕后,位置和姿态相互固定,在理想情况下应完全重合。

1.2 导引头测角误差分析

基于 1.1 节的 4 个坐标系,可知该导引头系统测角误差来源(见图 2)为:

1) 由于弹体与镜筒配合面加工误差、安装时的装调误差,造成镜筒系相对弹体系存在俯仰角误差 $\Delta\theta_{lb}$ 及偏航角误差 $\Delta\gamma_{lb}$ 。上述误差角度定义满足以下坐标转换关系:

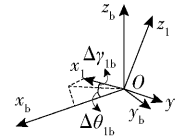
$$M_{lb} = R_{y_l}(\Delta\theta_{lb})R_{z_l}(\Delta\gamma_{lb}), \quad (1)$$

式中:

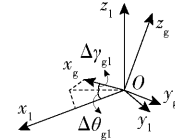
$$R_{y_l}(\Delta\theta_{lb}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{lb} & 0 & -\sin \Delta\theta_{lb} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta\theta_{lb} & 0 & \cos \Delta\theta_{lb} \end{bmatrix};$$

$$R_{z_l}(\Delta\gamma_{lb}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\gamma_{lb} & \sin \Delta\gamma_{lb} & 0 \\ -\sin \Delta\gamma_{lb} & \cos \Delta\gamma_{lb} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

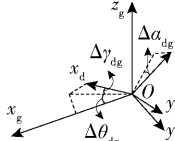
2) 由于光学镜片与镜筒配合面加工误差,隔圈、压圈加工误差以及镜头装调误差,造成光学系统



(a) 弹体坐标系与镜筒坐标系
(a) Coordinates of projectile body and lens tube



(b) 镜筒坐标系与光学坐标系
(b) Coordinates of lens tube and optical system



(c) 光学坐标系与探测器坐标系
(c) Coordinates of optical system and detector

图 2 坐标系示意

Fig. 2 Coordinates

光轴与理想位置产生偏差,即存在俯仰角误差 $\Delta\theta_{gl}$ 及偏航角误差 $\Delta\gamma_{gl}$ 。上述误差角度定义满足以下坐标转换关系:

$$M_{gl} = R_{y_g}(\Delta\theta_{gl})R_{z_g}(\Delta\gamma_{gl}), \quad (2)$$

式中:

$$R_{y_g}(\Delta\theta_{gl}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{gl} & 0 & -\sin \Delta\theta_{gl} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta\theta_{gl} & 0 & \cos \Delta\theta_{gl} \end{bmatrix};$$

$$R_{z_g}(\Delta\gamma_{gl}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\gamma_{gl} & \sin \Delta\gamma_{gl} & 0 \\ -\sin \Delta\gamma_{gl} & \cos \Delta\gamma_{gl} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

3) 由于四象限探测器与镜筒配合的定位面、定位孔存在误差,使得探测器系与光学系产生滚转角误差 $\Delta\alpha_{dg}$ (四象限探测器测角原理不具有轴对称性,应计入滚转角误差)、俯仰角误差 $\Delta\theta_{dg}$ 及偏航角误差 $\Delta\gamma_{dg}$ 。上述误差角度定义满足以下坐标转换关系:

$$M_{dg} = R_{x_d}(\Delta\alpha_{dg})R_{y_d}(\Delta\theta_{dg})R_{z_d}(\Delta\gamma_{dg}), \quad (3)$$

式中:

$$R_{x_d}(\Delta\alpha_{dg}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\alpha_{dg} & \sin \Delta\alpha_{dg} \\ 0 & -\sin \Delta\alpha_{dg} & \cos \Delta\alpha_{dg} \end{bmatrix};$$

$$R_{y_d}(\Delta\theta_{dg}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{dg} & 0 & -\sin \Delta\theta_{dg} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta\theta_{dg} & 0 & \cos \Delta\theta_{dg} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{z_d}(\Delta\gamma_{dg}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\gamma_{dg} & \sin \Delta\gamma_{dg} & 0 \\ -\sin \Delta\gamma_{dg} & \cos \Delta\gamma_{dg} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

4) 探测器测角原理误差,通过文献[12]可知,四象限探测器测得光斑重心距探测器平面坐标系原点偏移值 dx 与实际偏移值 x 存在如下关系:

$$dx = \frac{k}{\pi} \left[2\arcsin \frac{x}{r} + \sin \left(2\arcsin \frac{x}{r} \right) \right], \quad (4)$$

式中: r 为重心距探测器平面坐标系原点的距离。根据上述方法测得光斑重心,结合镜头焦距可以求出目标俯仰角与偏航角。

5) 信号处理板引入系统误差,由于电学元器件、PCB 设计原理及加工误差等,造成输出量与实际值存在偏差。

上述均为该导引头系统误差,可以通过实验加以标定。若不考虑误差项 4 和 5,则可以通过坐标转换建立精确数学模型,然后利用实验进行参数标定达到目的。然而,由于误差项 4 的隐式非线性关系,及误差项 5 难以用精确数学模型表达,以至建立精准数学模型较为困难。因此,本文采用分块三次多项式的非参数标定法,对该导引头测角误差进行标定。

2 分块三次多项式标定原理

分块三次多项式标定实质为二维插值,因其对被插区域分块插值,可避免整体插值的 Runge 现象。另外,该方法属于分块内插,即在每个分块区域拟合一个三次曲面,由于其考虑了 1 阶偏导数与 2 阶混合导数,能保证相邻分块曲面的连续与光滑^[14]。

针对本文研究问题,将目标实际俯仰角 θ_r 、偏航角 γ_r 均视为测量俯仰角 θ_m 、偏航角 γ_m 的连续光滑函数,即

$$\theta_r = f(\theta_m, \gamma_m), \quad (5)$$

$$\gamma_r = h(\theta_m, \gamma_m), \quad (6)$$

式中: $f(\cdot)$ 、 $h(\cdot)$ 为被插函数,满足所需的连续性。该导引头光学系统及探测器测角范围为俯仰角不小于 $\pm 10^\circ$ 、偏航角不小于 $\pm 10^\circ$,工作范围为俯仰角不小于 $\pm 8^\circ$ 、偏航角不小于 $\pm 8^\circ$ 。因此,取被插区域为

$$\begin{cases} -10^\circ \leq \theta_m \leq 10^\circ, \\ -10^\circ \leq \gamma_m \leq 10^\circ. \end{cases} \quad (7)$$

对(7)式被插区域离散化,间隔 2° ,具体如图 3 所示。由图 3 可知,标定用实验数据点有 11×11 个。设图中阴影区域为某一分块被插区域,其左下角点序号为 (i, j) ,向右 i 序增大,向上 j 序增大。则

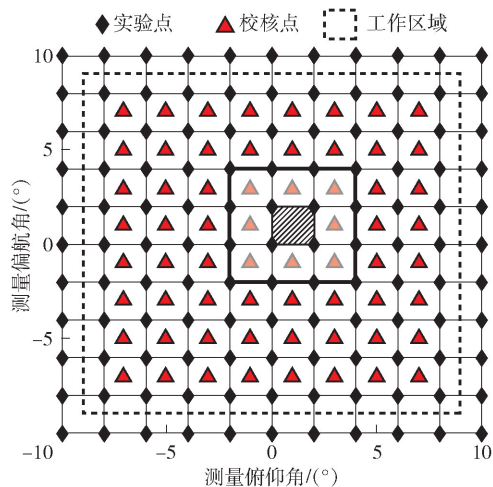


图 3 视场范围

Fig. 3 Range of field of view

可利用分块三次多项式拟合该区域函数曲面(为表述通用性,下以 X 、 Y 、 Z 表示横坐标、纵坐标及函数值):

$$Z = \sum_{q=0}^3 \sum_{p=0}^3 a_{pq} X^p Y^q = a_{00} + a_{10}X + a_{20}X^2 + a_{30}X^3 + a_{01}Y + a_{11}XY + a_{21}X^2Y + a_{31}X^3Y + a_{02}Y^2 + a_{12}XY^2 + a_{22}X^2Y^2 + a_{32}X^3Y^2 + a_{03}Y^3 + a_{13}XY^3 + a_{23}X^2Y^3 + a_{33}X^3Y^3, \quad (8)$$

式中: X 为测量俯仰角; Y 为测量偏航角; Z 为俯仰角真值或偏航角真值; a_{ij} 为待定系数。

令 $\mathbf{x} = [1 \ X \ X^2 \ X^3]^T$, $\mathbf{y} = [1 \ Y \ Y^2 \ Y^3]^T$, 则(8)式可表示为

$$z = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{y}, \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ 为待定系数矩阵。}$$

利用阴影区域及其外围,共 16 个实验点,可求得阴影区域 4 角点 1 阶偏导数和 2 阶混合导数:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{mn} = \frac{1}{2L}(z_{m+1,n} - z_{m-1,n}), \\ \left. \frac{\partial z}{\partial y} \right|_{mn} = \frac{1}{2L}(z_{m,n+1} - z_{m,n-1}), \\ \left. \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right|_{mn} = \frac{1}{4L^2}(z_{m+1,n+1} + z_{m-1,n-1} - z_{m-1,n+1} - z_{m+1,n-1}), \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m = i, i+1; n = j, j+1; L = 2^\circ$ 。再结合其函数值,有

$$\begin{bmatrix} z_{ij} \\ \vdots \\ \frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{ij} \\ \vdots \\ \frac{\partial z}{\partial y} \Big|_{ij} \\ \vdots \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \Big|_{ij} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{ij} & X_{ij}^2 & X_{ij}^3 & Y_{ij} & X_{ij}Y_{ij} & X_{ij}^2Y_{ij} & X_{ij}^3Y_{ij} & Y_{ij}^2 & X_{ij}Y_{ij}^2 & X_{ij}^2Y_{ij}^2 & X_{ij}^3Y_{ij}^2 & Y_{ij}^3 & X_{ij}Y_{ij}^3 & X_{ij}^2Y_{ij}^3 & X_{ij}^3Y_{ij}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & 2X_{ij} & 3X_{ij}^2 & 0 & Y_{ij} & 2X_{ij}Y_{ij} & 3X_{ij}^2Y_{ij} & 0 & Y_{ij}^2 & 2X_{ij}Y_{ij}^2 & 3X_{ij}^2Y_{ij}^2 & 0 & Y_{ij}^3 & 2X_{ij}Y_{ij}^3 & 3X_{ij}^2Y_{ij}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & X_{ij} & X_{ij}^2 & X_{ij}^3 & 2Y_{ij} & 2X_{ij}Y_{ij} & 2X_{ij}^2Y_{ij} & 2X_{ij}^3Y_{ij} & 3Y_{ij}^2 & 3X_{ij}Y_{ij}^2 & 3X_{ij}^2Y_{ij}^2 & 3X_{ij}^3Y_{ij}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2X_{ij} & 3X_{ij}^2 & 0 & 2Y_{ij} & 4X_{ij}Y_{ij} & 6X_{ij}^2Y_{ij} & 0 & 3Y_{ij}^2 & 6X_{ij}Y_{ij}^2 & 9X_{ij}^2Y_{ij}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{31} \\ \vdots \\ a_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

综上所述,根据(11)式可求得任意分块三次多项式的待定系数矩阵 **A**。当探测点落入某一分块区域时,根据(8)式可求得对应实际值,至此建立了探测值到实际值的映射关系。

3 标定实验与结果分析

3.1 实验方法

针对本文研究的某激光制导导引头,设计标定实验装置,实物如图 4 所示。

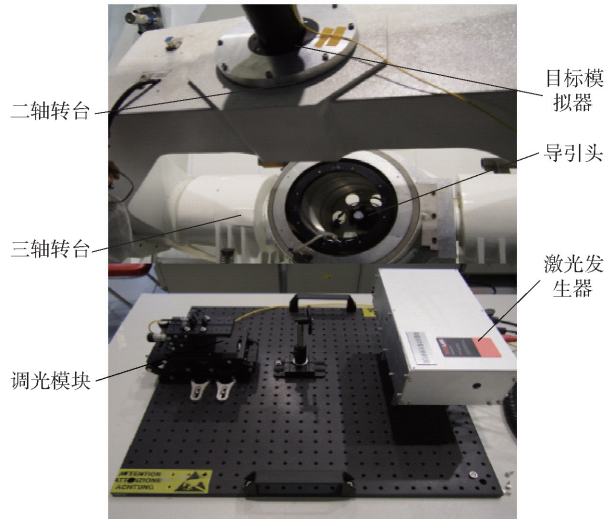


图 4 导引头标定实验实物

Fig. 4 Experimental system for calibration

由图 4 可知,实验系统包括:激光发生器、调光模块、目标模拟器、二轴转台、导引头、三轴转台,另外,还包含数据采集的上位机。依照图 3 所示实验点、校核点进行实验,具体步骤如下:

步骤 1 检查三轴转台、二轴转台同轴。将导引头固定于三轴转台滚转框架上;将目标模拟器固定于二轴转台内框架(俯仰轴)上。

步骤 2 用光纤将激光发生器、调光模块及目标发生器连接在一起;将激光发生器线路接通;将导引头线缆与上位机连接。

步骤 3 给二轴转台、三轴转台上电,使目标模拟器出射光线对准导引头光轴,给上位机、导引头、激光发生器上电,确定所有设备工作正常。

步骤 4 按照图 3 所示实验点、校核点进行测试。为了减小实验过程中由于振动、温度变化、电噪声等引起的随机误差对将来系统误差标定的影响,对每一个数据点对应的实际俯仰角、偏航角测量 4 次后取平均值,这里测角实际真值为转台测量值。这样可以保证置信概率 $P=0.95$ 时,平均值随机误差比单次测量值更小^[15]。

步骤 5 测试完毕,保存数据。

实验共获得 121 组用于标定的数据和 64 组用于校核的数据,具体数值如表 1、表 2 所示。

3.2 标定与结果

根据分块三次多项式标定方法及实验获得用于标定的 121 组数据。将工作区域分为 64 块,对每一块区域分别建立由测量俯仰角、偏航角到实际俯仰角或偏航角的映射关系。

根据上述映射关系,将校核点俯仰角、偏航角分别代入对应区域关系式中,得到标定后的俯仰角与偏航角 θ_c, γ_c 。记原测量俯仰角、偏航角误差为 $\Delta\theta_o = \theta_m - \theta_r, \Delta\gamma_o = \gamma_m - \gamma_r$;标定后俯角、偏航角误差为 $\Delta\theta_n = \theta_c - \theta_r, \Delta\gamma_n = \gamma_c - \gamma_r$ 。

为直观表示标定前后俯仰角、偏航角误差,分别将俯仰角、偏航角误差随测量俯仰角、偏航角的分布绘制如图 5、图 6 所示,对上述误差进行统计后,绘制直方图如图 7 所示。

由图 5、图 6 可知,标定后误差较标定前数值减小,且在导引头工作视场区域内波动小,具有良好的

表 1 标定点实验数据
Tab. 1 Experimental data for calibration

标定偏航角/(°)	实际测量角	标定俯仰角/(°)										
		-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
-10	俯仰角/(°)	-9.811	-8.271	-5.860	-3.581	-1.602	0.283	2.031	3.986	6.114	8.332	10.372
	偏航角/(°)	-10.606	-10.534	-10.429	-10.372	-10.276	-10.144	-10.090	-10.061	-10.036	-10.021	-9.971
-8	俯仰角/(°)	-9.761	-8.210	-5.786	-3.519	-1.618	0.207	1.987	3.883	5.917	8.181	10.210
	偏航角/(°)	-8.713	-8.597	-8.513	-8.352	-8.252	-8.161	-8.112	-8.056	-8.019	-8.006	-7.973
-6	俯仰角/(°)	-9.712	-8.107	-5.674	-3.551	-1.619	0.136	1.869	3.715	5.743	7.976	10.026
	偏航角/(°)	-6.691	-6.500	-6.323	-6.186	-5.994	-5.890	-5.836	-5.776	-5.774	-5.755	-5.725
-4	俯仰角/(°)	-9.632	-8.047	-5.668	-3.522	-1.661	0.079	1.758	3.582	5.568	7.764	9.874
	偏航角/(°)	-4.492	-4.397	-4.287	-4.098	-3.985	-3.858	-3.801	-3.726	-3.712	-3.660	-3.596
-2	俯仰角/(°)	-9.525	-8.016	-5.627	-3.536	-1.721	0.039	1.691	3.469	5.400	7.593	9.714
	偏航角/(°)	-2.585	-2.493	-2.376	-2.335	-2.163	-2.053	-1.962	-1.898	-1.867	-1.806	-1.734
0	俯仰角/(°)	-9.416	-8.108	-5.670	-3.621	-1.744	-0.049	1.615	3.350	5.278	7.473	9.632
	偏航角/(°)	-0.720	-0.695	-0.604	-0.447	-0.372	-0.293	-0.192	-0.106	-0.069	-0.011	0.026
2	俯仰角/(°)	-9.639	-8.187	-5.797	-3.684	-1.790	-0.076	1.574	3.363	5.251	7.408	9.472
	偏航角/(°)	1.012	1.086	1.211	1.278	1.320	1.445	1.551	1.592	1.679	1.789	1.847
4	俯仰角/(°)	-9.817	-8.254	-5.958	-3.783	-1.884	-0.160	1.532	3.286	5.225	7.406	9.381
	偏航角/(°)	2.835	2.918	3.006	3.053	3.082	3.156	3.292	3.459	3.633	3.780	3.869
6	俯仰角/(°)	-9.874	-8.521	-6.176	-3.950	-2.009	-0.200	1.515	3.283	5.284	7.431	9.443
	偏航角/(°)	5.024	5.061	5.060	5.079	5.104	5.163	5.318	5.486	5.681	5.905	6.079
8	俯仰角/(°)	-9.963	-8.727	-6.438	-4.072	-2.115	-0.252	1.466	3.273	5.275	7.521	9.471
	偏航角/(°)	7.282	7.340	7.279	7.272	7.339	7.424	7.555	7.715	7.935	8.180	8.321
10	俯仰角/(°)	-10.037	-8.964	-6.620	-4.132	-2.236	-0.301	1.412	3.261	5.262	7.618	9.534
	偏航角/(°)	9.438	9.474	9.527	9.672	9.729	9.849	9.971	10.060	10.110	10.185	10.313

表 2 校核点实验数据
Tab. 2 Experimental data for validation

校核偏航角/(°)	实际测量角	校核俯仰角/(°)							
		-7	-5	-3	-1	1	3	5	7
-7	俯仰角/(°)	-6.920	-4.581	-2.569	-0.744	1.060	2.801	4.806	6.987
	偏航角/(°)	-7.509	-7.310	-7.181	-7.047	-6.996	-6.954	-6.895	-6.906
-5	俯仰角/(°)	-6.844	-4.525	-2.575	-0.783	0.988	2.687	4.638	6.727
	偏航角/(°)	-5.333	-5.183	-5.032	-4.903	-4.815	-4.745	-4.720	-4.672
-3	俯仰角/(°)	-6.829	-4.557	-2.568	-0.847	0.926	2.603	4.497	6.552
	偏航角/(°)	-3.369	-3.241	-3.076	-3.016	-2.886	-2.852	-2.811	-2.765
-1	俯仰角/(°)	-6.850	-4.557	-2.625	-0.883	0.838	2.514	4.348	6.385
	偏航角/(°)	-1.507	-1.412	-1.326	-1.215	-1.139	-1.057	-1.023	-0.925
1	俯仰角/(°)	-6.906	-4.640	-2.713	-0.921	0.803	2.442	4.305	6.342
	偏航角/(°)	0.236	0.372	0.459	0.505	0.613	0.732	0.744	0.851
3	俯仰角/(°)	-7.077	-4.752	-2.757	-0.973	0.734	2.400	4.245	6.286
	偏航角/(°)	2.030	2.114	2.182	2.259	2.336	2.495	2.581	2.739
5	俯仰角/(°)	-7.268	-4.896	-2.870	-1.071	0.696	2.408	4.239	6.309
	偏航角/(°)	4.008	4.049	4.024	4.128	4.208	4.345	4.530	4.701
7	俯仰角/(°)	-7.559	-5.121	-2.987	-1.115	0.647	2.352	4.263	6.352
	偏航角/(°)	6.133	6.159	6.170	6.199	6.311	6.477	6.677	6.920

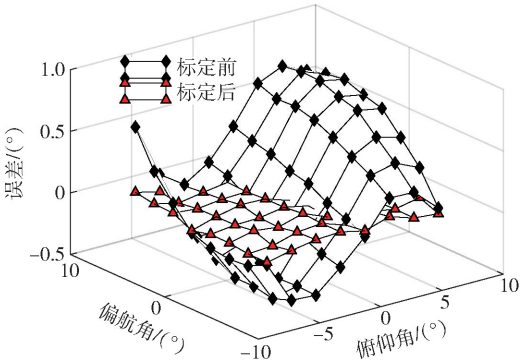


图 5 俯仰角误差分布
Fig. 5 Distribution of pitch angle errors

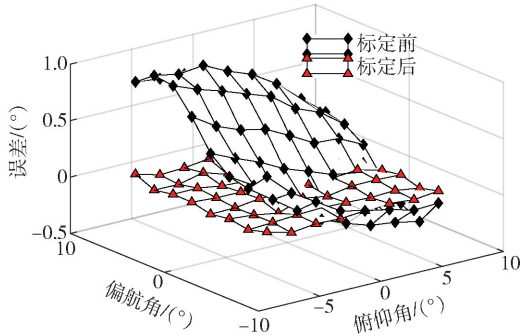


图 6 偏航角误差分布
Fig. 6 Distribution of yaw angle errors

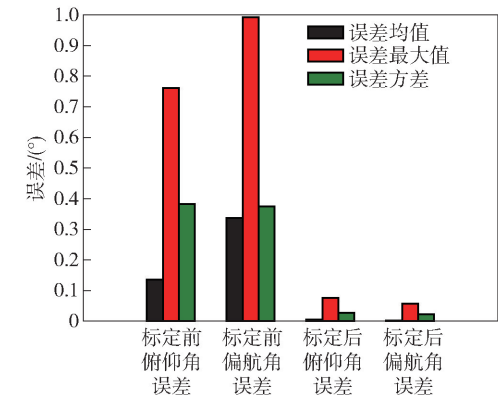


图 7 标定前和标定后俯仰角、偏航角误差统计
Fig. 7 Statistic values of pitch and yaw angle errors

稳定性。由图 7 可知:标定后俯仰角、偏航角误差均值由原来的 $0.136\ 0^{\circ}$ 、 $0.336\ 4^{\circ}$ 降至 $0.004\ 7^{\circ}$ 、 $0.001\ 5^{\circ}$;最大误差由原来的 $0.761\ 1^{\circ}$ 、 $0.992\ 0^{\circ}$ 降至 $0.076\ 1^{\circ}$ 、 $0.057\ 1^{\circ}$;方差由原来的 $0.382\ 0^{\circ}$ 、 $0.375\ 2^{\circ}$ 降至 $0.026\ 9^{\circ}$ 、 $0.022\ 7^{\circ}$ 。

4 结论

本文首先分析某激光捷联导引头误差来源,结合各项误差特点提出应用分块三次多项式标定其系

统误差的方法;其次给出该方法的数学原理;最后设计实验,考虑随机误差的影响,通过实验对所提方法进行验证。该方法与现有方法比,可以避免参数建模的困难,更适应本研究对象测角误差标定;根据所提方法数学原理,采用分块三次插值,可以对误差数据进行更好拟合,提高标定精度;标定过程中与现有方法比,考虑随机误差对标定系统误差的影响,标定结果更可靠。针对上述所提方法,开展标定实验,实验结果证明此方法有效可靠、简单易行、容易推广,对工程实践具有参考应用价值。

参考文献 (References)

[1] WALDMANN J. Line-of-sight rate estimation and linearizing control of an imaging seeker in tactical missile guided by proportional navigation[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2002, 10(4):556-567.

[2] 刘石祥,尹健,杜肖,等. 基于寄生回路的导引头传递函数及测试方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5):227-233.

LIU S X, YIN J, DU X, et al. Transfer function and test method of seeker based on parasitic loop[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5):227-233. (in Chinese)

[3] 崔瑞青,王景文,李晓梅,等. 四象限探测器解算模型误差分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(5):516-519.

CUI R Q, WANG J W, LI X M, et al. Model error analysis of quadrant photodetector[J]. Laser and Infrared, 2011, 41(5):516-519. (in Chinese)

[4] 李波,韩月,丁翔,等. 攻击地面群目标的空地导弹雷达与红外复合制导方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(5):919-926.

LI B, HAN Y, DING X, et al. Radar and infrared compound guidance method for air-to-ground missile attacking ground group-target[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(5):919-926. (in Chinese)

[5] DU G L, ZHANG P. Online robot calibration based on vision measurement[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(6):484-492.

[6] YANG X D, WU L, LI J Q. A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3):326-334.

[7] 李华晋. 非参数模型摄像机标定方法及误差分析[D]. 天津:天津大学, 2012.

LI H J. Non-parametric model camera calibration method and error analysis[D]. Tianjin:Tianjin University, 2012. (in Chinese)

[8] 王欢,周凌,张鑫,等. 检校场标定长焦航测相机参数[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2):435-441.

WANG H, ZHOU L, ZHANG X, et al. Calibration parameters of long focal aerial mapping camera by means of calibration field[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2):435-441. (in Chinese)

[9] HUANG L, MA W L, HUANG J L. Modeling and calibration of pointing errors with alt-az telescope[J]. New Astronomy, 2016,

- 47;105 – 110.
- [10] 孙辉, 刘慧, 罗安治, 等. 应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2060 – 2068.
SUN H, LIU H, LUO A Z, et al. Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and least square estimation [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 2060 – 2068. (in Chinese)
- [11] 赵明, 白杨, 刘慧, 等. 导引头稳定平台指向误差建模与参数标定[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(增刊2): 374 – 379.
ZHAO M, BAI Y, LIU H, et al. Pointing error modeling and parameter calibration for seeker stabilized platform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 374 – 379. (in Chinese)
- [12] 赵明, 朱明超, 白杨, 等. 应用 LPOE 公式与遗传算法标定导引头运动学参数[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 687 – 694.
ZHAO M, ZHU M C, BAI Y, et al. Calibration of kinematic parameters of seekers by LPOE formula and genetic algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(3): 687 – 694. (in Chinese)
- [13] 朱明超, 王涛, 贾宏光. 基于指数积公式的导引头运动学分析与标定[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1556 – 1562.
ZHU M C, WANG T, JIA H G. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1556 – 1562. (in Chinese)
- [14] 陈勇, 祝天瑞, 李蕊. 基于插值法的四象限探测器测角算法设计与实现方法分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 544 – 548.
CHEN Y, ZHU T R, LI R. Design and realization of the angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 544 – 548. (in Chinese)
- [15] 霍炬, 张贵阳, 崔家山, 等. 测量误差不确定性加权的立体视觉位姿估计目标函数[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 834 – 842.
HUO J, ZHANG G Y, CUI J S, et al. An objective function with measuring error uncertainty weighted for pose estimation in stereo vision [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(4): 834 – 842. (in Chinese)
- [16] 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 70 – 90.
WANG P J, XU Y M. Geo-spatial information science [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 70 – 90. (in Chinese)
- [17] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 22 – 25.
MAO Y T. Error theory and accuracy analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 22 – 25. (in Chinese)