

文章编号 1004-924X(2015)07-2060-09

应用模型线性化和最小二乘估计的 导引头指向精度标定

孙辉^{1*}, 刘慧¹, 罗安治^{1,2}, 马伍元¹, 董文辉¹, 赵明³, 贾宏光¹

(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 100039;

3. 徐州徐工随车起重机有限公司, 江苏 徐州 221000)

摘要:为了减小和消除平台框架的加工、装配误差,传感器误差等对双摆框架导引头指向精度的影响,提出了应用模型线性化方法和分步最小二乘估计的指向误差标定方法。根据双摆框架导引头的运动学特性,同时考虑影响指向精度的各误差项,建立了系统运动学方程。然后,重新构造运动学方程,建立了由表示控制输入指向的矢量到实际指向矢量的线性化模型。最后,根据分步求解的思路,采用最小二乘法获得了由表示控制输入指向的矢量到实测指向矢量的映射矩阵,实现了指向误差的标定。实验结果显示:标定后偏航角与俯仰角误差均值分别由原来的92.63"和75.94"减小至2.86"和2.85",标准差也分别由原来的95.01"和77.44"减小至11.11"和11.15"。结果表明:该标定算法在视轴工作空间中具有较高的精度和良好的稳定性,且方便易行,可广泛应用于各类光电设备的指向误差标定。

关键词:导引头;指向精度;最小二乘估计;指向误差标定;模型线性化

中图分类号:TJ765.331 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152307.2060

Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and least square estimation

SUN Hui^{1*}, LIU Hui¹, LUO An-zhi^{1,2}, MA Wu-yuan¹, DONG Wen-hui¹,
ZHAO Ming³, JIA Hong-guang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. XCMG Xuzhou Truck-mounted Crane Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

* Corresponding author, Email: sunhui0304@hotmail.com

Abstract: To reduce and eliminate the effects of pendulum frame processing, assembly error, sensor error on the pointing accuracy of a double pendulum frame seeker, a new pointing error calibration method was introduced through model linearization and least square estimation method. The kinematic equations of the system were built according to the kinematics of the double pendulum frame seeker

收稿日期:2014-11-17;修订日期:2015-01-06.

基金项目:中国科学院三期创新工程资助项目(No. YYYJ-1122)

and each error term affecting the pointing accuracy. Then, the kinematic equations were reconstructed to establish the linear equation from the vector of control input to the actual pointing vector. Finally, according to the step-solving ideas, the least square method was used to obtain the mapping matrix from the vector of control input to the actual pointing vector and to implement the pointing calibration. The experiment results show that after calibration the means of the yaw angle error and pitch angle error have reduced from the original 92.63 "and 75.94" to 2.86 "and 2.85", respectively, and the standard deviations have also reduced from 95.01 "and 77.44" to 11.11 "and 11.15", respectively. The results demonstrate that the proposed calibration algorithm has high accuracy and good stability in the working space of the light of sight of the seeker, and can be conveniently applied. This method also is able to be widely used in pointing error calibration in various types of optoelectronic devices.

Key words: seeker; pointing accuracy; least square estimation; calibration of pointing error; model linearization

1 引 言

导引头是现代精确制导系统的重要组成部分,主要用于目标的自主搜索、识别、跟踪与测量^[1]。作为光电探测系统的一种,导引头对隔离载体扰动、保持光学传感器视轴指向精度的要求尤为苛刻^[2-3]。它不仅直接影响图像的观测质量和目标捕获及跟踪,而且还会影响系统目标的瞄准精度,进而影响后续火力打击的误差^[4]。目前导引头一般采用稳定平台来隔离弹体扰动,从而实现稳定、高精度的目标跟踪^[5]。但由于平台框架加工误差、装配误差以及装调精度引起的轴系综合误差等影响^[6-7],导引头实际运动学参数会偏离理论参数,使得视轴角位置与角速度产生误差,从而影响视轴在惯性空间内的精度与稳定^[8]。另一方面,过分的通过加工、装配和调校来提高轴系精度又往往会造成设备研制周期和成本的大幅上升。因此,进一步提高制导系统的精度仍是人们特别关注的课题。由于系统标定具有使用方便灵活、设计成本低、研制周期短,且能够显著提高系统精度等特点,目前已被广泛应用于提高各类精密仪器的系统精度。标定是建模、测量、参数辨识、误差补偿等步骤的集成^[7,9],正确的建模方法、准确的参数辨识和恰当的误差补偿措施往往能够突破设计极限,使得系统精度获得数量级的提高。

张智勇^[4]等对影响光电探测系统指向精度的误差源进行了全面分析,并建立了具有明确意义

的线性模型,提出了基于半参数回归模型的标定算法来修正模型线性化误差。该方法虽然获得了较好的标定效果,然而其忽略了次要影响对模型线性化所产生的理论误差,另外,该方法的标定过程较为复杂。薛向尧等结合单项差法及坐标变换思想建立了激光发射系统的指向误差模型。由于该模型是一阶模型,其修正精度不高^[10]。朱明超等采用局部指数积方法建立了导引头的运动学误差模型^[11],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^[12],从而限制了该误差模型的应用。Ying Bai等提出了基于模糊在线插值的方法用于标定机器人姿态误差,并与双线性插值、三次样条插值和 cubic spline 插值做了比较,获得了较高的姿态精度,但由于该方法没有建立系统误差模型,往往需要大量测量数据来实现精确标定^[13-14]。

本文针对导引头的运动学参数标定问题,提出了应用模型线性化方法和分步最小二乘估计相结合的指向误差标定方法。首先,根据双摆框导引头的运动学特性,在充分考虑影响系统精度的各个误差项的基础上,建立了由视轴指向到基座的运动学方程。然后,对运动学方程进行了重新构造,建立了由表示控制输入指向矢量到实际指向矢量的线性化模型,并根据分步求解的思路,采用最小二乘估计方法获得了由表示控制输入指向的矢量到实测指向矢量的映射矩阵,实现了指向误差的标定。最后,搭建了实验系统测试了所提方法性能。

2 导引头运动学模型建模

导引头光学稳定平台安装在导弹头部,平台基座固连在弹体上。为了隔离弹体扰动,实现目标跟踪,稳定平台采用俯仰-偏航双框架结构,即可以绕俯仰轴和偏航轴运动。导引头结构如图 1 所示。

由图 1 可知,导引头由弹体(基座)、偏航框架、俯仰框架与光学系统组成,基座、偏航框架和俯仰框架之间通过轴承相连,俯仰框架与光学系统采用刚性连接。

导引头的运动可视为由偏航轴、俯仰轴组成的开环运动链。为了描述运动,分析精度,在偏航轴与俯仰轴的交点处建立了图 1 所示的 4 个坐标系:

a. 弹体坐标系 $B(\alpha_B y_B z_B)$

弹体坐标系与弹体固连,原点 o 为视轴球形工作空间的球心, α_B 轴为弹体与外框架轴向配合柱面轴线, $o y_B$ 轴方向为外框架周向定位销孔的轴线方向, $o z_B$ 轴由右手直角坐标系确定。

b. 偏航轴坐标系 $V(\alpha_V y_V z_V)$

偏航轴坐标系与偏航框架固连, $o y_V$ 轴与偏航轴重合,当偏航框架处于零位时, α_V 轴平行于弹体坐标系的 α_B 轴, $o z_V$ 轴由右手直角坐标系确定。

c. 俯仰轴坐标系 $H(\alpha_H y_H z_H)$

俯仰轴坐标系与俯仰框架固连, $o z_H$ 轴与俯仰轴重合,当偏航框架处于零位时, α_H 轴平行于弹体坐标系 α_B 轴, $o z_H$ 轴由右手直角坐标系确定。

d. 视轴坐标系 $T(\alpha_T y_T z_T)$

视轴坐标系固连在光学系统上, α_T 轴与视轴重合,理想情况下,与俯仰轴坐标系也重合。

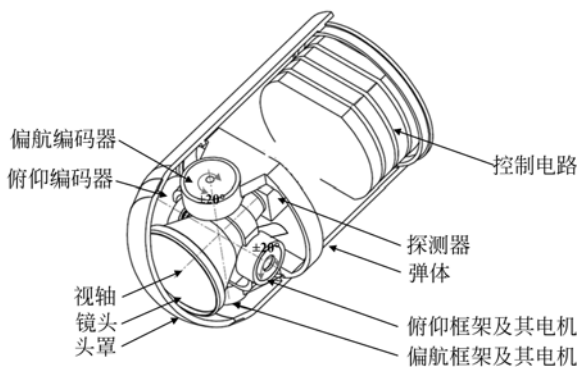


图 1 导引头结构简图

Fig. 1 Diagram of seeker structure

2.1 导引头运动学建模

导引头运动学建模^[15]需要充分考虑影响指向精度的各个误差项,从功能上而言,影响指向精度的主要误差源包括光学系统误差、机械框架误差、控制系统误差以及由于环境引起的误差等^[4]。其中:光学误差包括光轴晃动以及视轴装调误差;机械框架误差包括由于装配、调校引起的误差:轴系垂直度误差、回转误差、零位误差等;控制误差主要指回路的稳定跟踪误差以及传感器误差;环境引起的误差包括外界环境引起的变化,如温度、重力、阵风、振动等因素。下面在考虑各个影响因素的基础上,建立由视轴坐标系到基座坐标系的变换关系。

2.1.1 光轴坐标系 T 变换到俯仰轴坐标系 H

由于制造、装配等原因,光轴与俯仰轴的 $o y_H z_H$ 平面存在垂直度误差 $\Delta\alpha_T$ 、 $\Delta\beta_T$,视轴坐标系变换到俯仰轴坐标系的误差矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_H^T = \mathbf{Rot}(z_T, \Delta\alpha_T) \mathbf{Rot}(y_T, \Delta\beta_T), \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{Rot}(y_T, \Delta\beta_T) = \begin{bmatrix} \cos\Delta\beta_T & 0 & -\sin\Delta\beta_T \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\beta_T & 0 & \cos\Delta\beta_T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Rot}(z_T, \Delta\alpha_T) = \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha_T & \sin\Delta\alpha_T & 0 \\ -\sin\Delta\alpha_T & \cos\Delta\alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1.2 俯仰轴坐标系 H 到偏航轴坐标系 V

俯仰轴坐标系到偏航轴坐标系的误差主要包括垂直度误差以及编码器的测量误差、零位误差和联轴节误差。其变换的误差矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_V^H = \mathbf{Rot}(x_H, \Delta\gamma_H) \mathbf{Rot}(z_H, \Delta\alpha_H) \mathbf{Rot}(y_H, \Delta\beta), \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{Rot}(y_H, \Delta\beta) = \begin{bmatrix} \cos\Delta\beta & 0 & -\sin\Delta\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\beta & 0 & \cos\Delta\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Rot}(z_H, \Delta\alpha_H) = \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha_H & \sin\Delta\alpha_H & 0 \\ -\sin\Delta\alpha_H & \cos\Delta\alpha_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Rot}(x_H, \Delta\gamma_H) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\gamma_H & \sin\Delta\gamma_H \\ 0 & -\sin\Delta\gamma_H & \cos\Delta\gamma_H \end{bmatrix}$$

其中: $\Delta\beta = \beta + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\beta_3$, 等式右侧 4 项分别表示俯仰轴编码器读出值、测量误差、零位误差

和联轴节误差; $\Delta\alpha_H$ 、 $\Delta\gamma_H$ 表示俯仰轴系到偏航轴系的垂直度误差。

2.1.3 偏航轴坐标系 V 到基座坐标系 B

与俯仰轴坐标系到偏航轴坐标系的误差相似,该变换同样由垂直度误差以及编码器的测量误差、零位误差和联轴节误差等几部分组成。其变换的误差矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_B^V = \mathbf{Rot}(y_V, \Delta\beta_V)\mathbf{Rot}(x_V, \Delta\gamma_V)\mathbf{Rot}(z_V, \Delta\alpha), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Rot}(z_V, \Delta\alpha) &= \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha & \sin\Delta\alpha & 0 \\ -\sin\Delta\alpha & \cos\Delta\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{Rot}(x_V, \Delta\gamma_V) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\gamma_V & \sin\Delta\gamma_V \\ 0 & -\sin\Delta\gamma_V & \cos\Delta\gamma_V \end{bmatrix} \\ \mathbf{Rot}(y_V, \Delta\beta_V) &= \begin{bmatrix} \cos\Delta\beta_V & 0 & -\sin\Delta\beta_V \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\beta_V & 0 & \cos\Delta\beta_V \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中: $\Delta\alpha = \alpha + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3$, 等式右侧四项分别表示偏航轴编码器读出值、测量误差、零位误差和联轴节误差; $\Delta\beta_V$ 、 $\Delta\gamma_V$ 表示偏航轴系到弹体系的垂直度误差。

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = [\mathbf{H}]_{3 \times 9} \cdot [1 \quad \cos\alpha \quad \sin\alpha \quad \cos\beta \quad \sin\beta \quad \cos\alpha\cos\beta \quad \cos\alpha\cos\beta \quad \sin\alpha\sin\beta \quad \sin\alpha\cos\beta]^T, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix} = [\mathbf{H}]_{3 \times 9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cdots & \cos\alpha_n \\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 & \cdots & \sin\alpha_n \\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cdots & \cos\beta_n \\ \sin\beta_1 & \sin\beta_2 & \cdots & \sin\beta_n \\ \cos\alpha_1\cos\beta_1 & \cos\alpha_2\cos\beta_2 & \cdots & \cos\alpha_n\cos\beta_n \\ \cos\alpha_1\sin\beta_1 & \cos\alpha_2\sin\beta_2 & \cdots & \cos\alpha_n\sin\beta_n \\ \sin\alpha_1\sin\beta_1 & \sin\alpha_2\sin\beta_2 & \cdots & \sin\alpha_n\sin\beta_n \\ \sin\alpha_1\cos\beta_1 & \sin\alpha_2\cos\beta_2 & \cdots & \sin\alpha_n\cos\beta_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

3 应用最小二乘估计的标定原理

最小二乘估计是工程上常用的参数辨识和参

将上述变换相乘,即可得到从视轴坐标系到基座坐标系的变换:

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_B^V \mathbf{M}_V^H \mathbf{M}_H^T \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: $[x_T, y_T, z_T]^T$ 表示视轴坐标系下的单位矢量, $[x_B, y_B, z_B]^T$ 表示基座坐标系下的单位矢量。

2.2 线性模型的建立

为了提高基于模型的导引头指向精度标定,减小计算量,对含有三角函数的方程组进行线性化至关重要。本文采用一种新的线性化方法,其既不丧失标定精度又方便求解。式(4)可以表述为式(5)。

将式(5)右侧矩阵重新组合,可以变换为如式(6)模型。

同理, n 次标定线性模型如式(7)所示。

由式(7)可知,对于给定的控制输入偏航角 α 与俯仰角 β , 等式左侧矩阵每列向量与等式右侧与控制输入相关矩阵的每列向量均为常数值,因此原含有三角函数的非线性方程组可简化为关于 $[\mathbf{H}_{3 \times 9}]$ 的线性方程组,而指向误差标定则变换为对参数 $[\mathbf{H}_{3 \times 9}]$ 的辨识。

数估计方法,最早是在 1795 年高斯为了解决天文学上的定轨问题时提出的。由于其不需要考虑估计参数和观测数据的统计特性且计算较为方便,因此成为一种应用最广泛的估计方法^[16]。然

而传统的最小二乘估计难以对矩阵参数进行辨识,故本文提出采用分步最小二乘估计的方法对导引头视轴的指向误差进行标定。对式(8)求转置,得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} = \Psi^T \cdot [\mathbf{H}_{3 \times 9}]^T, \quad (8)$$

其中:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \dots & \cos \alpha_n \\ \sin \alpha_1 & \sin \alpha_2 & \dots & \sin \alpha_n \\ \cos \beta_1 & \cos \beta_2 & \dots & \cos \beta_n \\ \sin \beta_1 & \sin \beta_2 & \dots & \sin \beta_n \\ \cos \alpha_1 \cos \beta_1 & \cos \alpha_2 \cos \beta_2 & \dots & \cos \alpha_n \cos \beta_n \\ \cos \alpha_1 \sin \beta_1 & \cos \alpha_2 \sin \beta_2 & \dots & \cos \alpha_n \sin \beta_n \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 & \dots & \sin \alpha_n \sin \beta_n \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \dots & \sin \alpha_n \cos \beta_n \end{bmatrix}$$

分别取式(8)等号左侧矩阵的第一列和 $[\mathbf{H}_{3 \times 9}]$ 第一行可以重新构成等式:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \Psi^T \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \\ \vdots \\ H_{1n} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\text{令 } \mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \\ \vdots \\ H_{1n} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}}_1 = \begin{bmatrix} \hat{H}_{11} \\ \hat{H}_{12} \\ \vdots \\ \hat{H}_{1n} \end{bmatrix}$$

则此时观测值 \mathbf{X}_1 与其估计值 $\hat{\mathbf{X}}_1 = \Psi^T \hat{\mathbf{H}}_1$ 残差的平方和为:

$$J(\hat{\mathbf{H}}_1) = (\mathbf{X}_1 - \Psi^T \hat{\mathbf{H}}_1)^T \cdot (\mathbf{X}_1 - \Psi^T \hat{\mathbf{H}}_1), \quad (10)$$

将式(10)对 $\hat{\mathbf{H}}_1$ 求偏导数并令偏导数等于零可以得到 $\hat{\mathbf{H}}_1$ 的估计值:

$$\frac{\partial J(\hat{\mathbf{H}}_1)}{\partial \hat{\mathbf{H}}_1} = -2 \Psi^T \cdot (\mathbf{X}_1 - \Psi^T \hat{\mathbf{H}}_1) = 0. \quad (11)$$

当 $(\Psi^T \Psi)^{-1}$ 存在时,即可得到 $\hat{\mathbf{H}}_1$ 的最小二乘估计:

$$\hat{\mathbf{H}}_1 = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \mathbf{X}_1. \quad (12)$$

同理可以得到 $\hat{\mathbf{H}}_2, \hat{\mathbf{H}}_3$ 的最小二乘估计,从而得到 $\hat{\mathbf{H}}$ 的最小二乘估计:

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_1^T \\ \hat{\mathbf{H}}_2^T \\ \hat{\mathbf{H}}_3^T \end{bmatrix}. \quad (13)$$

4 标定试验及模型修正结果分析

4.1 试验方法

以某红外导引头系统为例,设计实验装置对标定算法进行验证,实物图如图2所示。试验系统主要包括:①导引头稳定平台,②导引头控制系统,③Leica MR系列激光跟踪仪系统(精度为10 μm)和④数据采集系统。实测姿态的工作点仅仅是视轴工作空间的一个子集,为了更精确地反映导引头的运动学特性,将实测工作点均布在工作空间中并尽可能增加测试点。

实验步骤具体如下:

步骤1. 由激光跟踪仪标定出弹体坐标系 $B(\alpha_{x_B}, y_B, z_B)$ 。弹体与外框架轴向配合柱面轴线为弹体坐标系的 α_{x_B} 轴,视轴球形工作空间的球心选为弹体坐标系的原点 o ,外框架周向定位销孔轴线方向为弹体坐标系 $o y_B$ 轴方向,由右手直角坐标系确定 $o z_B$ 轴。

步骤2. 测试用于标定的数据。本实验中,使用导引头控制系统控制视轴按照如表1所示的标

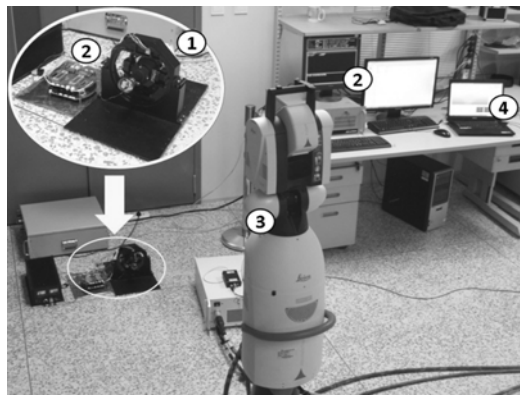


图2 视轴姿态测量实验实物图

Fig. 2 Experiment system of attitude measurement for visual axis

定次序依次运动,先做偏航运动,后做俯仰运动,使用激光跟踪仪在弹体坐标系 $B(\alpha x_B, y_B, z_B)$ 中测量出导引头的偏航角误差和俯仰角误差。

步骤 3. 测试用于验证的数据。使用与步骤 2 同样的测试方法,按照表 2 中所示的角度运动,并测试响应的偏航角误差和俯仰角误差。

步骤 4. 测试完毕,保存数据用于系统标定与验证。

试验共获得用于标定的数据 121 组和用于验证的数据 81 组,具体数值分别如表 1、表 2 所示。其中, (α, β) 、 (α', β') 和 (α_c, β_c) 分别表示控制输入、实测和标定后的偏航角和俯仰角; $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha$, $\Delta\beta = \beta' - \beta$ 分别表示视轴的偏航角和俯仰角误差; $\Delta\alpha_c = \alpha_c - \alpha'$, $\Delta\beta_c = \beta_c - \beta'$ 分别表示标定后视轴的偏航角和俯仰角与控制角度误差; $\Delta\alpha_r = \alpha' - \alpha_c$, $\Delta\beta_r = \beta' - \beta_c$ 分别表示标定后视轴的偏航角和

俯仰角与实测偏航角和俯仰角的残差,即标定后视轴的偏航角和俯仰角误差。

4.2 指向误差标定

根据线性化最小二乘法,使用检测获得的 121 组用于标定的数据,对导引头指向误差进行标定,得到参数 \hat{H} 的值如表 3 所示(为了方便表示,表格中为 $\hat{H} \times 10^3$)。

为了较直观地得到指向误差的标定结果,绘制出实测和标定后的视轴偏航角与俯仰角的偏差以及残差分别如图 3、图 4 所示;绘制标定前后偏航角与俯仰角误差统计直方图如图 5 所示。由上述结果可以得知,经过标定后,偏航角与俯仰角误差的均值、最大值和标准差较原来均有较大减小,达到了较好的效果。

表 1 用于标定的实验数据^[17]
Tab.1 Experiment data for calibration^[17]

偏航、俯仰角误差/(")	偏 航 角										
	-20°	-16°	-12°	-8°	-4°	0°	4°	8°	12°	16°	20°
-20°	146.0	138.9	143.4	106.7	137.8	106.6	106.1	128.5	127.8	130.6	103.0
	73.8	71.4	80.5	48.4	84.2	57.4	61.3	88.1	91.5	98.2	74.4
-16°	129.3	113.3	128.2	105.8	107.4	116.7	121.8	114.5	111.9	94.4	121.3
	64.9	53.4	72.9	54.9	60.9	74.5	83.9	80.6	81.9	68.1	98.5
-12°	113.9	103.4	92.4	99.3	103.4	127.4	126.5	108.5	103.8	119.3	112.8
	57.0	50.9	44.3	55.6	63.9	92.0	95.1	80.9	79.9	98.8	95.6
-8°	107.6	116.8	93.4	114.1	86.9	93.9	110.2	119.5	110.4	97.9	95.1
	57.9	71.5	52.4	77.3	54.2	65.1	85.2	98.0	92.3	83.1	83.3
俯 -4°	118.3	96.7	93.4	109.5	91.8	99.9	78.6	88.9	91.6	113.9	89.2
	75.8	58.5	59.3	79.4	65.6	77.5	59.8	73.5	79.4	105.0	82.7
仰 0°	73.9	90.1	75.1	109.5	99.3	81.5	96.1	83.6	86.9	74.0	107.2
	38.5	58.8	47.8	86.1	79.6	65.4	83.5	74.1	80.4	70.3	105.9
角 4°	71.9	78.3	93.4	77.0	95.1	96.9	104.2	95.8	98.2	79.5	85.2
	43.5	53.9	73.0	60.3	82.0	87.2	97.7	92.2	97.4	81.2	89.2
8°	77.6	66.8	82.5	73.2	79.4	76.7	89.1	97.1	63.7	86.8	66.2
	56.3	49.5	69.0	63.3	72.9	73.4	88.8	99.6	68.8	94.0	75.5
12°	63.3	58.9	51.4	79.4	76.0	52.4	83.8	65.0	78.0	57.8	92.8
	49.4	48.7	44.9	76.3	76.2	55.6	89.9	73.7	88.9	70.7	107.5
16°	53.0	57.9	66.1	58.3	66.8	52.1	85.8	78.9	85.7	58.9	75.5
	46.5	55.1	66.8	62.4	74.0	62.1	98.5	93.9	102.7	77.6	95.7
20°	52.5	36.8	65.9	47.5	59.2	67.4	74.6	62.1	46.5	63.7	77.1
	53.8	41.7	74.2	59.0	73.6	84.4	94.0	83.7	69.8	88.5	103.1

表 2 用于检验的实验数据^[17]
Tab. 2 Experiment data for validation^[17]

偏航、俯仰 角误差/($''$)	偏 航 角								
	-19°	-14°	-10°	-7°	-3°	2°	9°	15°	18°
-18°	126.4	133.3	134	109.8	141.1	126.4	125.6	127.9	112.6
	59.3	72	77.2	56.4	92.2	83	89.5	97.6	85.2
-15°	122.3	107	130	105.3	98.9	109.4	122.8	98.4	119
	61	51.3	78.8	57.4	55.4	71	91.5	72.7	96
-9°	104.3	115.8	98.2	105.3	121.7	112.1	105.7	123.8	102.3
	53.9	70.9	57.6	67.8	88.2	83.6	83.6	107	87.6
俯 -2°	98.5	97.1	98.7	113.2	104.8	85.1	90.7	88.3	83.5
	60.6	64.5	70.1	87.4	82.8	67.6	79	81.1	78.3
仰 3°	86.8	76.3	67.2	100.8	89.9	99.5	100.1	78.8	80.5
	57.7	52.2	47	83.4	76.1	89.9	95.8	78.5	82.1
角 7°	66.2	96.2	77.7	64.8	71.9	80.8	74.3	72.2	78.3
	44.1	79	64.3	54.1	64.6	77.4	75.9	77.5	85.3
10°	67.9	91.3	72.1	75.7	77.6	58.6	94.3	92.5	73.5
	51.2	79.4	63.8	70.1	75.2	60.1	101	102	84.6
14°	76.9	61.2	64.3	84.7	68.7	80.1	72.6	87.8	90.2
	67.6	56.6	63.1	86	73.1	88.1	84.9	103	107
19°	70.5	53.1	54.6	77.1	78	77.5	82	65.9	51.3
	70.7	57.8	62.6	87.5	91.3	94	102	88.8	75.3

表 3 参数 H 标定结果
Tab. 3 Calibrated values of parameter H

$(H \times 10^3)$	$H_{i,1}$	$H_{i,2}$	$H_{i,3}$	$H_{i,4}$	$H_{i,5}$	$H_{i,6}$	$H_{i,7}$	$H_{i,8}$	$H_{i,9}$
$H_{1,j}$	4.685	-4.793	-0.748	-4.711	-0.911	1 004.819	0.555	0.215	0.318
$H_{2,j}$	8.971	-9.175	-0.281	-9.328	-2.121	9.982	1.731	-0.008	1 000.314
$H_{3,j}$	-10.885	11.107	0.361	11.078	-998.053	-11.671	-1.999	-0.185	-0.637

4.3 标定结果验证

采用如表 3 所示标定结果,对用于验证的 81 组实测数据进行标定, 标定结果如图 6、图 7 所

示,误差统计结果如表 4 所示。由上述结果可知, 经过标定,偏航角和俯仰角误差的标定残差均在 $\pm 20''$ 内波动,较标定前有较大改善,由表 4 可知,

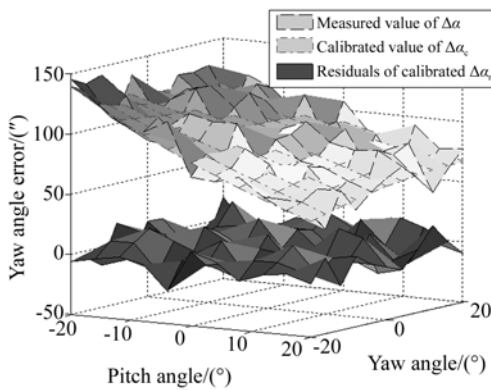


图 3 视轴偏航角误差
Fig. 3 Yaw angle errors of light of sight

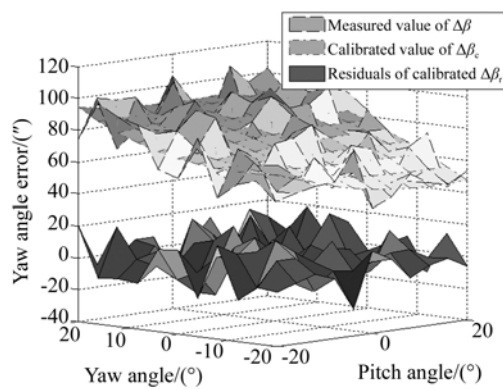


图 4 视轴俯仰角误差
Fig. 4 Pitch angle errors of light of sight

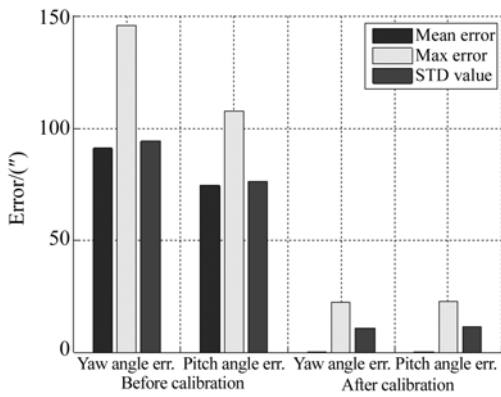


图 5 标定前后偏航角与俯仰角的误差统计结果

Fig. 5 Statistic values of yaw and pitch angle errors before and after calibrations

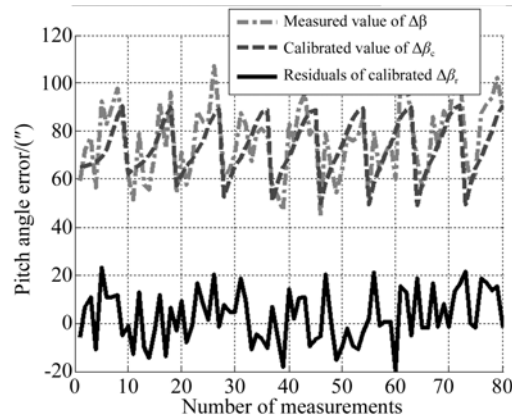


图 7 视轴俯仰角误差

Fig. 7 Pitch angle errors of light of sight

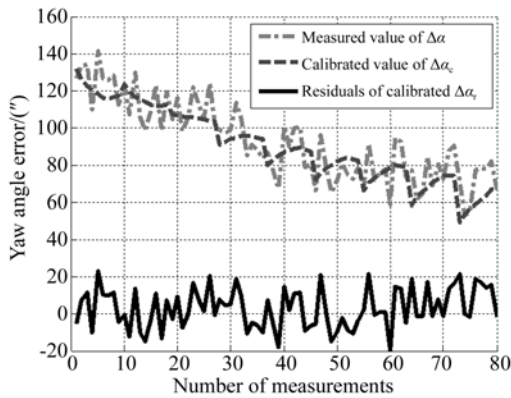


图 6 视轴偏航角误差

Fig. 6 Yaw angle errors of light of sight

表 4 标定前后视轴指向误差对比

Tab. 4 Comparison between original and calibrated errors of light of sight

类型	偏航角误差/(")		俯仰角误差/(")	
	标定前	标定后	标定前	标定后
均值	92.63	2.86	75.94	2.85
最大值	141.10	23.13	107.00	23.28
标准差	95.01	11.11	77.44	11.15

标定后偏航角与俯仰角的误差均值均在 2" 附近, 标准差也分别由 95.01" 和 77.44" 减小至 11.11" 和 11.15", 说明运动学标定模型在视轴工作空间内稳定性较好。

5 结 论

本文在导引头运动学建模和分析视轴指向精度影响因素的基础上, 建立了既不损失标定精度又便于求解的线性化模型; 通过分步最小二乘估计方法解决了矩阵的估计问题, 确定了由控制输入的视轴指向到实测视轴指向的映射关系。经实测数据验证, 标定后偏航角与俯仰角的误差均值分别由原来的 92.63" 和 75.94" 减小至 2.86" 和 2.85", 标准差也分别由原来的 95.01" 和 77.44" 减小至 11.11" 和 11.15"。实验结果表明该标定算法在视轴工作空间中具有较高的精度和良好的稳定性。该方法能够有效修正系统误差, 为导引头视轴稳定控制奠定了基础, 且方便易行, 可广泛用于各类光电设备的指向误差标定。

参考文献:

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

[2] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology [J]. *IEEE Control Systems Magazine*,

2008, 28(1): 26-46.

[3] MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems: tracking dynamic targets with mobile sensors [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 47-64.

[4] 张智永, 周晓尧, 范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. *航空学报*, 2011, 32(11): 2042-2054.

ZHANG ZH Y, ZHOU X R, FAN D P. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection systems [J]. *Acta Aeronautica*

- et Astronautica Sinica*, 2011, 32(11): 2042-2054. (in Chinese)
- [5] RUSSELL T R. Strap-down stabilization for imaging seekers [C]. *Proceedings of the AIAA SDIO 2nd Annual Interceptor Technology Conference*, Albuquerque, 1993.
- [6] 徐涛, 李博, 刘廷霞, 等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3), 782-789.
XU T, LI B, LIU T X, *et al.*. Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3), 782-789. (in Chinese)
- [7] 王涛, 朱明超, 閻胜利, 等. 稳定平台轴系精度视轴指向误差的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2265-2269.
WANG T, ZHU M CH, YIN SH L, *et al.*. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2265-2269. (in Chinese)
- [8] 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 CH, BAI Y, *et al.*. Calibration of kinematic parameters of seekers by LPOE formula and genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3), 687-694. (in Chinese)
- [9] CHEN I, YANG G. Kinematic calibration of modular reconfigurable robots using product of exponential formula [J]. *Journal of Robotic System*, 1997, 14(11), 807-821.
- [10] 薛向尧, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式激光发射系统指向误差的修正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 536-544.
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Correction of laser pointing error of level mounting laser transmitter system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 536-544. (in Chinese)
- [11] 朱明超, 王涛, 贾宏光, 等. 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 CH, WANG T, JIA H G, *et al.*. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1556-1562. (in Chinese)
- [12] HE R B, ZHAO Y J, YANG SH N, *et al.*. Kinematic parameter identification for serial robot calibration based on POE formula [J]. *IEEE transactions on Robotics*, 2010, 26(3): 411-423.
- [13] BAI Y, WANG D L. On the comparison of trilinear, cubic spline and fuzzy interpolation methods in high accuracy measurements [J]. *IEEE Transactions on fuzzy Systems*, 2010, 18(5): 1016-1022.
- [14] BAI Y, WANG D L. Improve the position measurement accuracy using a dynamic online fuzzy interpolation technique [C]. *IEEE Int. Symp. Comput. Intell. Meas. Syst. Appl.*, 2003: 227-232.
- [15] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光机所研究生部内部教材, 2003.
WANG J Q. [M]. *General Design of Optical Instruments* [M]. Changchun: Interior Materials of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [16] 谢克明, 李国勇. 现代控制理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
XIE K M, LI G Y. *Modern Control Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [17] 赵明. 半捷联光电稳定平台误差分析与补偿研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
ZHAO M. *Study on error analysis and compensation of semi-strap-down photo-electricity stabilized platform* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

作者简介:



孙 辉(1986—), 男, 河南商丘人, 硕士, 助理研究员, 2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学硕士学位, 主要从事机械振动控制, 精密仪器设计等方面的研究。E-mail: sunhui0304@hotmail.com