

# 光电探测系统半参数模型运动学标定

罗安治<sup>1,2</sup> 孙辉<sup>1</sup> 贾宏光<sup>1</sup> 赵明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所飞行器部, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100039

<sup>3</sup>徐州徐工随车起重机有限公司, 江苏 徐州 221000

**摘要** 针对光电探测系统高指向精度要求,提出了补偿最小二乘法与双三次样条插值相结合的半参数模型标定算法来减小系统指向误差。根据光电探测系统结构组成,运用多体系统理论建立系统指向误差参数模型。引入非参数分量,建立半参数模型,应用补偿最小二乘法对半参数模型进行标定得到修正模型。搭建实验平台测得两组数据,分别用于运动学标定与验证修正结果。实验结果表明:系统方位向、俯仰向指向误差均值从92.1185"、75.9358"降低到2.7100"、2.7755",指向误差标准差从21.6522、15.1744降低到10.8645、10.7305。表明提出的标定算法能有效提高光电探测系统指向精度和空间指向稳定性,且能同时考虑系统误差的线性与非线性关系。

**关键词** 光电探测系统; 指向误差; 补偿最小二乘法; 半参数模型; 运动学标定

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0104001

## Semi-Parametric Model Kinematic Calibration of Photoelectric Detecting System

Luo Anzhi<sup>1,2</sup> Sun Hui<sup>1</sup> Jia Hongguang<sup>1</sup> Zhao Ming<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

<sup>3</sup>XCMG Xuzhou Truck-Mounted Crane Co. Ltd, Xuzhou, Jiangsu 221000, China

**Abstract** In order to meet the high pointing precision of photoelectric detecting system, a kinematic calibration algorithm using penalized least square method and bicubic spline interpolation is proposed to decrease the pointing error. According to the structure component of the photoelectric detecting system, the parametric model of pointing error is established by multi-body system theory. In consideration of the non-parametric component, semi-parametric model is established, and the model is calibrated by penalized least square method to get the modified model. A prototype experimental platform is built, and two groups of data are measured, which are collected to calibrate the model and verify the modified results. The experimental results demonstrate that the mean values of azimuth and elevation pointing error are reduced from 92.1185", 75.9358" to 2.7100", 2.7755". The standard deviation values of azimuth and elevation pointing error are also reduced from 21.6522, 15.1744 to 10.8645, 10.7305. The experiment and results can make it clear that the algorithm is able to improve the pointing precision and stability of pointing effectively. Besides, the linear and nonlinear relationships are considered simultaneously.

**Key words** photoelectric detecting system; pointing error; penalized least square method; semi-parametric model; kinematic calibration

**OCIS codes** 040.1880; 040.5160; 120.4570

收稿日期: 2015-07-07; 收到修改稿日期: 2015-08-26

基金项目: 中国科学院三期创新工程资助项目(YYYJ-1122)

作者简介: 罗安治(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学精密机械结构与误差分析方面的研究。

E-mail: luoz1990@126.com

导师简介: 贾宏光(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光机电系统微小化与精确制导技术方面的研究。

E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

光电探测系统是运动载体上实现目标识别、跟踪并保证远程精确打击的核心部件,为了实现各运动载体的实际工作要求,光电探测系统需要具备高指向精度与空间指向稳定性<sup>[1]</sup>。但是,系统稳定平台加工和装配过程中存在的几何误差,运行过程中的测角误差、环境影响等因素,导致光电探测系统在实际工作中引入不稳定的指向误差。指向误差必然影响运动载体对目标的识别、截获、跟踪和打击的精度。为了提高系统指向精度与指向稳定性,必须标定并修正系统指向误差<sup>[2-3]</sup>。

根据光电探测系统模型不同,可以分为参数模型、非参数模型与半参数模型<sup>[4-5]</sup>。参数模型需要对系统做出大量的假设,将复杂的系统近似为线性化模型。参数模型标定发展较早,也较为成熟,但严格的线性模型实际情况中极少存在。非参数模型形式任意,对于解释变量与响应变量分布的限制极少,有较强的适应性,但对系统信息的表现不足。半参数模型既包含参数信息,也包含非参数信息,是一种更贴近以实际系统的模型,可以解决单纯的线性或非线性模型难以解决的问题。针对参数模型标定:刘又午等<sup>[6]</sup>利用多体系统理论建立数控机床全误差模型,并使用9线法确定所有误差参数;赵明等<sup>[7]</sup>使用局部指数积方法建立导引头运动学模型,应用遗传算法对模型参数进行辨识。针对半参数模型标定:周前飞等<sup>[8]</sup>利用多体系统理论建立光电探测系统指向误差模型,考虑到结构特性与非线性误差的共同作用,使用两阶段估计算法标定了半参数回归模型。

针对光电探测系统指向误差标定,提出了应用补偿最小二乘法与双三次样条插值的半参数模型运动学标定算法。使用多体系统理论建立光电探测系统指向误差模型,并且线性化得到参数模型;考虑到系统误差的线性关系与非线性关系,引入非参数分量,建立半参数模型。使用补偿最小二乘法标定得参数估计值与所有观测点非参数估计值,并且由非参数估计值插值得到非参数分量表达式。根据参数估计值与非参数分量表达式可以得到指向误差估计值表达式,即系统指向误差修正模型,进而求得残余误差;最后,搭建实验平台获得光电探测系统指向误差数据,验证系统指向误差标定结果。本文主要工作在于引入补偿最小二乘法与双三次样条插值相结合的算法,用来标定传统标定算法难以解决的半参数模型标定问题。

# 2 指向误差参数模型

如图(1)所示,光电探测系统结构示意图。系统可以看成是一个复杂的多轴机械结构,建立连续坐标系,按多体系统分析方法建立模型<sup>[9-10]</sup>。

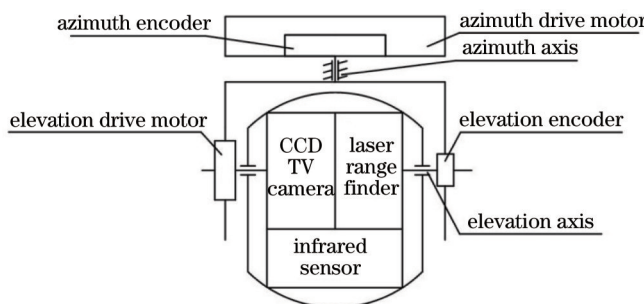


图1 光电探测系统结构示意图  
Fig.1 Structure of photoelectric detecting system

## 1) 光轴轴系

由于目标脱靶量误差的存在,实际目标指向与理想目标指向之间存在方位角误差  $\Delta\alpha_{oi}$  和俯仰角误差  $\Delta\beta_{oi}$ ,这2个齐次坐标变换构成总的D-H变换矩阵:

$$T_r^i = R(z, \Delta\alpha_{oi})R(y, \Delta\beta_{oi}), \tag{1}$$

式中  $R$  为关于旋转的4×4阶齐次坐标变换矩阵,表示绕坐标系的  $X$  或  $Y$  或  $Z$  轴旋转一定角度的变换。探测器  $O$  系光轴与测距机  $L$  系激光光轴实际并不重合,存在光轴晃动与一致性误差  $\Delta\alpha_{oy}$ 、 $\Delta\beta_{oy}$  :

$$T_L^o = R(z, \Delta\alpha_{oy})R(y, \Delta\beta_{oy}), \tag{2}$$

探测器  $O$  系与俯仰轴  $E$  系组成两轴系统, 实际情况下存在垂直度误差  $\Delta\alpha_{oc}$ 、 $\Delta\beta_{oc}$  :

$$T_O^E = R(z, \Delta\alpha_{oc})R(y, \Delta\beta_{oc}) . \quad (3)$$

### 2) 俯仰轴系

俯仰轴  $E$  系与俯仰参考  $E_0$  系之间由转动引起的偏差产生的回转误差  $\Delta\theta_{eh}$ 、 $\Delta\alpha_{eh}$  和俯仰轴实际转角  $\hat{\beta} = \beta + \Delta\beta$ ,  $\beta$  为理想转角,  $\Delta\beta$  光电编码器误差; 俯仰参考  $E_0$  系相对于方位轴  $A$  系存在垂直度误差  $\Delta\alpha_{ec}$  和  $\Delta\theta_{ec}$  :

$$T_E^{E_0} = R(y, \hat{\beta})R(x, \Delta\theta_{eh})R(z, \Delta\alpha_{eh}) , \quad (4)$$

$$T_{E_0}^A = R(z, \Delta\alpha_{ec})R(x, \Delta\theta_{ec}) . \quad (5)$$

### 3) 方位轴系

方位轴  $A$  系与方位参考  $A_0$  系之间由转动引起的偏差产生的回转误差  $\Delta\theta_{ah}$ 、 $\Delta\alpha_{ah}$  和方位轴实际转角  $\hat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha$ ,  $\alpha$  为理想转角,  $\Delta\alpha$  为光电编码器误差; 方位参考  $A_0$  系相对于基座  $B$  系存在垂直度误差  $\Delta\beta_{ac}$  和  $\Delta\theta_{ac}$  :

$$T_{A_0}^A = R(z, \hat{\alpha})R(y, \Delta\beta_{ah})R(x, \Delta\theta_{ah}) , \quad (6)$$

$$T_{A_0}^B = R(y, \Delta\beta_{ac})R(x, \Delta\theta_{ac}) . \quad (7)$$

根据多系统理论和光电探测系统坐标系设定, 以基座坐标系为参考坐标系, 其余坐标系为联体坐标系, 可以将系统指向误差模型表示为:

$$p_B = T_{A_0}^B T_A^{A_0} T_E^A T_{E_0}^E T_O^E T_L^O T_T^L p_T , \quad (8)$$

式中  $p_B$  为目标在基座坐标系  $B$  下的直角坐标,  $p_T$  为目标指向坐标系  $X_T$  轴的单位指向向量。各项误差量  $\Delta$  均为极小值, 即可近似  $\cos \Delta = 1$ 、 $\sin \Delta = \Delta$ 、 $\Delta_i \Delta_j = 0$ 。根据  $\tan(\alpha + \delta\alpha) = y/x$ 、 $\sin(\beta + \delta\beta) = -z$ ,  $\delta\alpha$ 、 $\delta\beta$  为方位角、俯仰角指向误差, 将直角坐标模型转换为方位角、俯仰角指向误差分量线性模型如(9)式所示:

$$\begin{cases} \delta\alpha = (\Delta\alpha_{eh} + \Delta\alpha_{oc} + \Delta\alpha_{oy} + \Delta\alpha_{ot})\sec\beta + (\Delta\theta_{ah} + \Delta\theta_{ec})\tan\beta + \Delta\beta_{ac} \sin\alpha \tan\beta + \\ \Delta\theta_{ac} \cos\alpha \tan\beta + (\Delta\alpha + \Delta\alpha_{ec}) + \gamma \\ \delta\beta = (\Delta\beta + \Delta\beta_{ah} + \Delta\beta_{oc} + \Delta\beta_{oy} + \Delta\beta_{ot}) - \Delta\theta_{ac} \sin\alpha + \Delta\beta_{oc} \cos\alpha + \varphi \end{cases} , \quad (9)$$

$$X = [\Delta\alpha + \Delta\alpha_{ec}, \Delta\alpha_{eh} + \Delta\alpha_{oc} + \Delta\alpha_{oy} + \Delta\alpha_{ot}, \Delta\theta_{ah} + \Delta\theta_{ec}, \Delta\beta_{ac}, \Delta\theta_{ac}, \Delta\beta + \Delta\beta_{ah} + \Delta\beta_{oc} + \Delta\beta_{oy} + \Delta\beta_{ot}, -\Delta\theta_{ac}, \Delta\beta_{oc}]^T , \quad (10)$$

设  $X$  如(10)式所示, 则光电探测系统方位角、俯仰角误差线性模型可以表示为:

$$\delta = AX + \Delta , \quad (11)$$

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & \sec\beta_1 & \tan\beta_1 & \sin\alpha_1 \tan\beta_1 & \cos\alpha_1 \tan\beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sec\beta_2 & \tan\beta_2 & \sin\alpha_2 \tan\beta_2 & \cos\alpha_2 \tan\beta_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sec\beta_n & \tan\beta_n & \sin\alpha_n \tan\beta_n & \cos\alpha_n \tan\beta_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{n \times 8} , \quad (12)$$

$$A_\beta = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n \end{bmatrix}_{n \times 8} , \quad (13)$$

式中  $\delta = [\delta\alpha, \delta\beta]^T$ 、 $A = [A_\alpha, A_\beta]^T$ 、 $\Delta = [\gamma, \varphi]^T$ 。

## 3 半参数模型标定

光电探测系统指向误差影响因素众多, 一部分与指向误差表现为线性关系; 另一部分表现为非线性关系。鉴于此, 可以考虑建立半参数模型, 使用补偿最小二乘法与双三次样条插值标定模型参数<sup>[11-12]</sup>。

### 3.1 补偿最小二乘法

光电探测系统经典参数模型如(11)式所示, 引入非参数分量  $S$ , 改写为半参数模型:

$$\delta = AX + S + \Delta , \quad (14)$$

$$\eta = A\hat{X} + \hat{S} - \delta, \quad (15)$$

则误差方程如(15)式所示,  $\hat{X}$  为参数估计量、 $\hat{S}$  为非参数估计量。半参数模型中  $\hat{X}$  与  $\hat{S}$  都是未知量, 经典最小二乘准则不能得到所有未知量的唯一解。需要引入补偿最小二乘准则:

$$\eta^T P \eta + \lambda \hat{S}^T R \hat{S} \rightarrow \min, \quad (16)$$

式中  $\lambda$  为平滑因子, 起到平衡非参数分量  $S$  与误差  $\eta$  的作用,  $\min$  表示取最小值;  $R$  称正规化矩阵, 为给定的正定或半正定矩阵。此时, 把补偿最小二乘问题视为条件极值问题。当正规化矩阵  $R$  为正定矩阵时, 构造函数:

$$L = \eta^T P \eta + \lambda \hat{S}^T R \hat{S} + 2K^T (A\hat{X} + \hat{S} - \delta - \eta), \quad (17)$$

设  $N = A^T P A$ 、 $M = P + \lambda R - P A N^{-1} A^T P$ , 由  $\partial L / \partial \eta = 0$ 、 $\partial L / \partial \hat{S} = 0$ 、 $\partial L / \partial \hat{X} = 0$  与 (15) 式得到方程组求得参数估计量  $\hat{X}$  与非参数估计量  $\hat{S}$ :

$$\hat{X} = N^{-1} A^T P \delta - N^{-1} A^T P \hat{S}, \quad (18)$$

$$\hat{S} = M^{-1} (P \delta - P A N^{-1} A^T P \delta), \quad (19)$$

当正规化矩阵  $R$  为半正定矩阵时, 需要对非参数分量  $S$  加以约束:  $G_{d \times n} S_{n \times 1} = 0$ , 式中  $d = n - \text{rank}(R)$ , 约束矩阵  $G$  为满秩矩阵, 且  $G$  的行向量是方程  $RX = 0$  的一组基础解系, 则构造条件极值函数如(20)式所示。

$$L = \eta^T P \eta + \lambda \hat{S}^T R \hat{S} + 2K^T (A\hat{X} + \hat{S} - \delta - \eta) + 2K_s^T G \hat{S}, \quad (20)$$

同理, 设  $M = P + U - P A N^{-1} A^T P$ 、 $N = A^T P A$ 、 $U = \lambda R + G^T G$ , 由  $\partial L / \partial \eta = 0$ 、 $\partial L / \partial \hat{X} = 0$ 、 $\partial L / \partial \hat{S} = 0$  与 (13) 式得到方程组求解得到参数估计量  $\hat{X}$ 、非参数估计量  $\hat{S}$  与拉格朗日乘子  $K_s$ :

$$\hat{X} = N^{-1} A^T P \delta - N^{-1} A^T P \hat{S}, \quad (21)$$

$$\hat{S} = M^{-1} P \delta - M^{-1} G^T K_s - M^{-1} A N^{-1} A^T P \delta, \quad (22)$$

$$K_s = (G U^{-1} G^T) G U^{-1} (P - P A N^{-1} A^T P) \delta, \quad (23)$$

### 3.2 正规化矩阵选取

时间序列法指: 半参数模型中, 观测值  $\delta$  是在时刻  $t_1, t_2, \dots, t_n$  得到的序列, 且相邻时刻半参数模型非参数分量  $s_i$  与  $s_{i+1}$  相差不大, 可取相邻非参数分量之差的平方和为正规化矩阵:  $S^T R S = \sum_{i=1}^{n-1} (s_{i+1} - s_i)^2$ , 则正规化矩阵:

$$R = T^T T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & & & & \\ -1 & 2 & -1 & & & & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & & & & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & -1 & 2 & -1 & & \\ & & & & & -1 & 1 & & \end{bmatrix}, \quad (24)$$

此时  $\text{rank}(R) = n - 1$ , 正规化矩阵  $R$  为半正定矩阵, 需要增加一个约束条件, 不妨设:

$$G_{1 \times n} S_{n \times 1} = (1, 1, \dots, 1) S = 0. \quad (25)$$

### 3.3 平滑因子选取

平滑因子  $\lambda$  影响到曲线的光滑程度, 是平衡非参数分量与残余误差的重要参数。交叉核权法指: 根据选取的平滑因子  $\lambda$ , 拟合观测样本, 得到各点预测值, 使所有预测值均方差最小。在选取时, 确定平滑因子  $\lambda$ , 将观测点  $(t_i, \delta_i)$  看作预测点, 即去除  $t_i$  时刻观测值, 使用其余  $n - 1$  个点标定半参数模型。再将  $(t_i, \delta_i)$  代入标定后半参数模型, 得到估计值  $\hat{\delta}_\lambda^i(t_i)$ , 于是定义交叉核权法如(26)式所示, 使其取得最小值的平滑因子  $\lambda$  即为所求值。

$$CV(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\delta_i - \hat{\delta}_\lambda^i(t_i)]^2, \quad (26)$$

确定平滑因子  $\lambda$  的计算量极大, 在实际应用中难以实现, 故常常使用试算来确定平滑因子  $\lambda$ 。

### 3.4 非参数分量标定

(19)式和(22)式得到了各观测点非参数估计值  $\hat{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , 通过双三次样条插值可以得到非参数估计值二维表达式  $S(x, y)^{[13]}$ 。三次样条插值指在节点上插值得到二阶可导的三次函数  $S(x)$ , 设:  $m_i = S'(x_i)$ ,  $h_i = x_{i+1} - x_i$ :

$$S(x) = XH(h_i)M \quad (27)$$

$$H(h_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3}{h_i^2} & -\frac{2}{h_i} & \frac{3}{h_i^2} & -\frac{1}{h_i} \\ \frac{2}{h_i^3} & \frac{1}{h_i^2} & -\frac{2}{h_i^3} & \frac{1}{h_i^2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x - x_i & (x - x_i)^2 & (x - x_i)^3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$M = [s_i \quad m_i \quad s_{i+1} \quad m_{i+1}]^T \quad (30)$$

对于二维函数图形绘制,提出了双三次样条插值函数。根据矩形网格节点  $(x_i, y_j)$  及其函数值  $s_{ij} = S(x_i, y_j)$ , 通过数值微分与三次样条插值得到:  $\varphi_{ij} = S'_x(x_i, y_j)$ 、 $\phi_{ij} = S'_y(x_i, y_j)$ 、 $\varepsilon_{ij} = S''_{xy}(x_i, y_j)$ 。如图(2)所示, 根据(27)式,沿  $y$  方向求得  $S(x, y)$  需要求解  $S(x, y_j)$ 、 $S'_y(x, y_j)$ 、 $S(x, y_{j+1})$  和  $S'_y(x, y_{j+1})$ 。将各节点  $s_{ij}$  与  $\varphi_{ij}$  代入(27)式,沿  $x$  方向对网格节点函数值  $s_{ij}$  进行插值,计算得  $S(x, y_j)$  和  $S(x, y_{j+1})$ 。将各节点  $\phi_{ij}$  和  $\varepsilon_{ij}$  代入(27)式,沿  $x$  方向对网格节点函数关于  $y$  的一阶导数  $S'_y(x, y_j)$  进行插值,可得到  $S'_y(x, y_j)$  和  $S'_y(x, y_{j+1})$ 。 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ 、 $y_j \leq y \leq y_{j+1}$  所示矩形域内双三次样条插值函数表示如下:

$$S(x, y) = XH(x_{i+1} - x_i)B[H(y_{j+1} - y_j)]^T Y \quad (31)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & y - y_j & (y - y_j)^2 & (y - y_j)^3 \end{bmatrix}^T \quad (32)$$

$$B = \begin{bmatrix} s_{ij} & \phi_{ij} & s_{ij+1} & \phi_{ij+1} \\ \varphi_{ij} & \varepsilon_{ij} & \varphi_{ij+1} & \varepsilon_{ij+1} \\ s_{i+1j} & \phi_{i+1j} & s_{i+1j+1} & \phi_{i+1j+1} \\ \varphi_{i+1j} & \varepsilon_{i+1j} & \varphi_{i+1j+1} & \varepsilon_{i+1j+1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

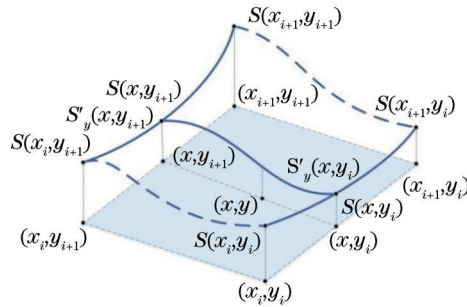


图2 双三次样条插值原理图

Fig.2 Schematic diagram of bicubic spline interpolation

针对光电探测系统半参数模型标定,首先建立半参数模型如(14)式。接着,选取适当的正规化矩阵  $R$  与平滑因子  $\lambda$ 。然后,使用补偿最小二乘法求解参数估计值  $\hat{X}$  与非参数估计值  $\hat{S}$ 。最后,插值得到非参数估计值表达式  $S(\alpha, \beta)$ , 标定得到方位角、俯仰角对应的指向误差半参数修正模型与残余误差:

$$\hat{\delta} = A(\alpha, \beta)\hat{X} + \hat{S}(\alpha, \beta) \quad (34)$$

$$\eta = \delta - \hat{\delta} = \delta - [A(\alpha, \beta)\hat{X} + \hat{S}(\alpha, \beta)] \quad (35)$$

## 4 实验验证

### 4.1 标定实验

以某光电探测系统为例,设计实验平台测定系统方位角、俯仰角与指向误差。如图(3)所示标定实验平台,主要实验设备包括:1) Leica MR 系列 10  $\mu\text{m}$  精度激光跟踪仪;2) 光电探测稳定平台;3) 光电探测控制系统;4) 测量数据采集系统。





图3 指向误差实验平台

Fig.3 Experimental platform of pointing errors

根据控制系统设定的理想指向,光电探测稳定平台转动方位轴与俯仰轴至目标指向。激光跟踪仪捕捉光轴上的点,得到转动后精确的实际指向角度。实验采集得到121组用于标定的系统方位角、俯仰角指向误差数据。接着,采集得到81组用于验证的指向误差数据。测量数据如文献[14]附录所示。

#### 4.2 实验结果分析

1) 由(24)式确定正规化矩阵  $R$ , 表(1)确定半参数模型系数矩阵  $A$ 。

2) 取若干平滑因子试算值,使(26)式取的最小值的即为实验优先值。在区间  $[0, 1000]$  内取值并对比得到平滑因子  $\lambda = 70$ 。

3) 将各参数代入(21)式和(22)式,得到参数估计量  $\hat{X}$  如(36)式所示,及非参数估计量  $\hat{S} = (s_1, s_2, \dots, s_{242})$ 。

$$\hat{X} = [56.0'', 34.3'', -445.3'', 77.3'', 357.0'', 17.5'', 55.1'', 58.1''] \quad (36)$$

4) 由各样本点非参数估计量插值得到非参数分量表达式  $\hat{S}(\alpha, \beta)$ 。

5) 如(34)式所示,确定指向误差半参数修正模型  $\hat{\delta}$ 。由(35)式确定残余误差  $\eta$ 。根据  $\hat{\delta}$ 、 $\delta$ 、 $\eta$  得到如图(4)所示的标定前后指向误差折线图。

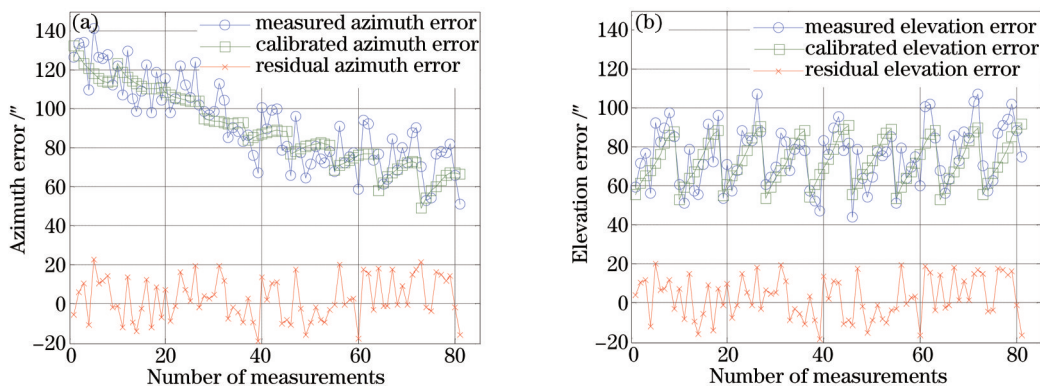


图4 标定前后光轴指向误差折线图。(a) 光轴方位角指向误差; (b) 光轴俯仰角指向误差

Fig.4 Line graph of optical axis pointing errors before and after calibration. (a) Azimuth pointing error of optical axis;

(b) elevation pointing error of optical axis

以指向误差均值、峰值和标准差为光电探测系统指向精度判定标准,计算标定前后光电探测系统指向误差各判定标准得表(1)。系统方位向、俯仰向指向误差均值从大于75"降低到3"以内,峰值从大于100"降低到23"以内,可知系统指向精度有了显著提高。系统方位向、俯仰向指向误差标准差值也有不同程度的降低,可见标定后系统空间指向稳定性好于修标定前。

表1 标定前后指向误差评价标准

Table 1 Criterion of pointing error before and after calibration

Criterion	Before calibration		After calibration	
	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation
Mean error	92.1185	75.9358	2.7100	2.7755
Peak error	141.1	107	22.9616	20.4155
Standard deviation	21.6522	15.1744	10.8645	10.7305

## 5 结 论

当光电探测系统对确定目标进行定位时:锁定目标,读取角度传感器当前测量值,由测量值解算出修正后指向角,得到目标确切位置信息。当光电探测系统对地理目范围进行搜索时:根据地理范围对应指向角解算出指向误差,修正给定指向角指令,最后由伺服控制系统实现修正后指向角。

为了更精确地修正指向角信息,提高光电探测系统指向精度,提出了基于补偿最小二乘法与双三次样条插值的半参数模型运动学标定算法来减小系统指向误差。经实验验证:指向误差均值从 $92.1185''$ 、 $75.9358''$ 降低到 $2.7100''$ 、 $2.7755''$ ;峰值从 $141.1''$ 、 $107''$ 降低到 $22.9616''$ 、 $20.4155''$ ,指向精度有很大提高;指向误差标准差从 $21.6522''$ 、 $15.1744''$ 降低到 $10.8645''$ 、 $10.7305''$ ,空间指向稳定性相较标定前有提高。由分析可知,基于补偿最小二乘法与双三次样条插值的半参数模型运动学标定能有效提高光电探测系统指向精度与空间指向稳定性,且同时考虑光电探测系统指向误差的线性与非线性关系,使模型更准确地描述实际系统。

## 参 考 文 献

- 1 Waldmann J. 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): 556-557.
- 2 Guan Banglei, Sun Xiangyi, Shang Yang, *et al.*. A camera calibration method for large field camera pointing at sky on sway platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712003.  
关棒磊, 孙祥一, 尚 洋, 等. 晃动平台上对空拍摄大视场摄像机的标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712003.
- 3 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform [J]. Chinese J Laser, 2013, 40(9): 0908007.  
王子辰, 戴 明, 李 刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908007.
- 4 Pan Xiong. The Estimation Theory and Application Research in Semi-Parametric Model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.  
潘 雄. 半参数模型的估计理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- 5 Thorson J T, Taylor I G. A comparison of parametric, semi-parametric, and non-parametric approaches to selectivity in age-structured assessment models[J]. Fisheries Research, 2014, 158: 74-83.
- 6 Liu Youwu, Zhang Qing, Zhao Xiaosong, *et al.*. Research on total error model and error compensation of CNC machine tool[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2003, 7: 46-50.  
刘又午, 章 青, 赵小松, 等. 数控机床全误差模型和误差补偿技术的研究[J]. 制造技术与机床, 2003, 7: 46-50.
- 7 Zhao Ming, Zhu Mingchao, Bai Yang, *et al.*. Calibration of kinematic parameters of seekers by LPOE formula and genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(3): 687-694.  
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.
- 8 Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Xiong Wenzhuo, *et al.*. Muti-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112005.  
周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112005.
- 9 Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2): 105-116.  
王家琪, 金 光, 严昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
- 10 Zhou Xiaoyao. Study on Error Analysis and Correction of Target Location for Electro-Optical Detection System[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2011.  
周晓尧. 光电探测系统目标定位误差分析与修正问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 11 Hu Hongchang. Estimation Methods and Their Applications in Semoparametric Model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.  
胡宏昌. 半参数模型的估计方法及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- 12 Haiyan S, Yun W. Semiparametric regression and model refining[J]. Geo-spatial Information Science, 2002, 5(4):10-13.
- 13 Lu Peiyan, Xiong Lizhen, Chen Shaoyong, *et al.* Nonlinear analysis of soils using the cubic and bicubic spline function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 46-62.  
陆培炎, 熊丽珍, 陈韶永, 等. 三次及双三次样条函数应用于土的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 46-62.
- 14 Zhao Ming. Study on Error Analysis and Compensation of Semi-Strapdown Photo-Electricity Stabilized Platform[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.  
赵 明. 半捷联光电稳定平台误差分析与补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.

栏目编辑: 刘丰瑞