

## 光电探测系统参数与非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>

(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. 徐州徐工随车起重机有限公司, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 为了提高光电探测系统指向精度, 提出并对比基于参数模型和非参数模型的运动学标定算法。首先, 根据系统组成, 全面分析光电探测系统指向误差来源。接着, 针对参数模型, 运用多体系统理论建立系统指向误差模型, 并应用最小二乘法对模型进行标定。然后, 针对非参数模型, 应用双线性插值算法进行指向误差模型标定。最后, 搭建实验平台, 获得用于标定和验证的两组实验数据。实验结果表明: 经过参数模型标定, 指向精度从 141.7" 提高到 22.2"; 经过非参数模型标定, 指向精度从 141.7" 提高到 27.9"。两种方法均能提高光电探测系统指向精度, 参数模型标定指向精度略高于非参数模型标定, 但是非参数模型运动学标定具有过程简单、计算量小的优势。

**关键词:** 运动学标定; 光电探测系统; 指向误差; 参数模型; 非参数模型

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0517005

## Parametric and non-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>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

**Abstract:** In order to improve the pointing precision of photoelectric detecting system, parametric and non-parametric model kinematic calibration algorithms were proposed. Firstly, based on the component of system, the pointing error sources of photoelectric detecting system were analyzed. Subsequently, in times of the parametric model, pointing error model was established by multi-body system theory, and the least square method was used to calibrate the model. Then, aiming at the non-parametric model, bilinear interpolation algorithm was used to calibrate the pointing error. Finally, structure of the experimental platform, and two groups of data were measured to do the kinematic calibration and verify the calibration model. The experimental results demonstrate that the pointing precision has been improved from 141.7" to

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-25

基金项目: 中国科学院三期创新工程基金(YYYJ-1122)

作者简介: 罗安治(1990-), 男, 硕士生, 主要从事光学精密机械结构与误差分析方面的研究。Email: laz\_icefire@126.com

导师简介: 贾宏光(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电系统微型化与精确制导技术方面的研究。Email: jiahg@ciomp.ac.cn

22.2" by parametric model calibration, and from 141.7" to 27.9" by non-parametric model calibration. These two algorithms can both improve the pointing precision. As for the system mentioned in this paper, the pointing precision of parametric model calibration is slightly higher, but non-parametric model calibration has simple modeling process and small computational complexity.

**Key words:** kinematic calibration; photoelectric detecting system; pointing error; parametric model; non-parametric model

## 0 引言

光电探测系统指装载于运动载体上,能对目标进行定位、瞄准、跟踪的光机电一体化系统,具有多光谱测量、隔离姿态扰动、保证光轴精确指向的优势。随着光机电一体化学科的发展,已经普遍应用于军事、农业等各领域。指向精度是光电探测系统的决定性评价指标,影响到探测系统对目标定位、瞄准、跟踪的准确性,可见指向误差标定对光电探测系统的重要意义<sup>[1]</sup>。

针对系统指向误差的运动学标定,有参数模型标定和非参数模型标定<sup>[2]</sup>。参数模型标定指先建立包含各误差分量的几何模型,再运用辨识算法标定模型参数,修正指向误差。参数模型标定算法已经比较成熟,王家琪、张智永等使用多体系统理论建立机载光电跟踪系统与探测系统指向误差模型,利用最小二乘法与两阶段估计法修正指向误差<sup>[3-4]</sup>。朱明超、赵明等运用局部指数积方法建立导引头光电平台指向误差模型,并且分别使用最小二乘法与遗传算法修正指向误差<sup>[5-6]</sup>。非参数模型标定<sup>[7]</sup>可以避免建立目标变量数学模型,直接建立自变量与响应变量对应关系。该方法不需要事先把模型假定为线性或是非线性的,具有补偿非线性误差、避免假定错误的优点。使用非参数模型标定系统指向误差时,基于空间对应关系,可以得到定义域内任意指向角对应的指向误差预测值,从而标定系统指向误差。

当光电探测系统对目标进行定位时: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范围进行搜索时:根据指向角指令解算出指向误差,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。

针对光电探测系统指向误差标定,提出了参数与非参数模型标定两种运动学标定算法。首先,对光电探测系统误差源进行全面分析。接着,针对参数模型标定,使用多体系统理论建立指向误差模型,再使用最小二乘法标定修正模型参数,得到指向误差预测值与残余误差。然后,针对非参数模型标定,不建立指向误差模型,直接使用双线性插值算法拟合原始指向误差得到修正模型,修正原始误差。最后,搭建实验平台获得用于标定和验证的两组实验数据,使用参数与非参数模型标定指向误差,并对比实验结果。

## 1 误差源分析

如图 1 所示,为光电探测系统结构示意图。从结构上看,图中系统指向误差来源有机械框架误差、光学系统误差、编码器误差<sup>[8]</sup>。

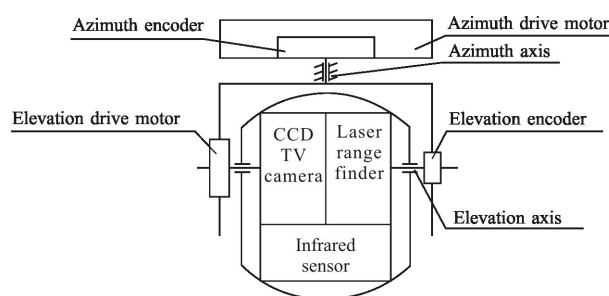


图 1 光电探测系统结构示意图

Fig.1 Structural diagram of photoelectric detecting system

### 1.1 机械框架误差

光电探测系统机械框架由基座和 3 个重要轴系组成:光轴轴系、俯仰轴系与方位轴系。

理想状态下,各轴系之间应该相互垂直。实际工作情况下,由于存在零件加工误差、装配误差,光轴与俯仰轴、俯仰轴与方位轴、方位轴与基座之间都存在垂直度误差。工作过程中俯仰轴与方位轴都绕回

转轴线有相对运动,而光轴没有横滚向转动,即方位轴、俯仰轴相对于框架都存在回转误差,光轴不存在回转误差。

### 1.2 光学系统误差

光学系统光具座上装有 CCD 相机、IR 红外传感器、LASER 激光测距机。多光学系统安装到光具座上时,各光轴轴线间存在一致性误差。IR 红外传感器、CCD 相机在工作时由于连续变焦晃动、热膨胀、重力载荷等因素的影响,焦平面上实际成像点与理想成像点间存在脱靶量误差。

### 1.3 光电编码器误差

光电编码器零位误差与测角误差也是指向误差重要来源。零位误差指编码器零位与机械框架零位不一致,零位误差很难消除,只有通过误差修正才能补偿零位误差对指向精度的影响。编码器自身的分辨率、电子噪声等影响因素,也会使测量结果与理想结果间存在测角误差。

## 2 应用最小二乘法的参数模型标定

### 2.1 多体系统理论

应用多体系统理论的指向误差建模是指将光电探测系统这个多轴系的复杂机械假设为一个多体系统,建立连续坐标系<sup>[9]</sup>。

基座坐标系( $B$ 系):原点定义为安装平面内系统框架的中心, $X_B$ 轴与 $Y_B$ 轴位于安装平面内, $Z_B$ 轴垂直于安装平面。

方位轴系:原点定义为系统框架的中心,方位轴参考坐标系( $A_0$ 系)的 $X_{A_0}$ 轴沿方位测角编码器零位方向, $Z_{A_0}$ 轴垂直于方位框架安装平面, $Y_{A_0}$ 轴在安装平面内。方位轴坐标系( $A$ 系)的 $Z_A$ 轴沿方位轴实际瞬时指向。

俯仰轴系:原点定义为系统框架的中心,俯仰轴参考坐标系( $E_0$ 系)的 $X_{E_0}$ 轴沿俯仰测角编码器零位方向, $Y_{E_0}$ 轴垂直于俯仰框架安装平面, $Z_{E_0}$ 轴在安装平面内。俯仰轴坐标系( $E$ 系)的 $Y_E$ 轴沿俯仰轴实际瞬时指向。

光轴轴系:原点为光电探测系统光具座中心,探测器光轴坐标系( $O$ 系)的 $X_O$ 轴方向为 IR 红外传感器或 CDD 相机光轴指向。激光测距机坐标系( $L$ 系)的 $X_L$ 轴方向为激光光轴指示方向。

目标指向坐标系( $T$ 系):成像焦平面上目标形心

为原点,光轴空间实际指向为 $X_T$ 轴。

### 2.2 指向误差模型

#### 2.2.1 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 $\Delta\alpha_{or}$ 和俯仰角误差 $\Delta\beta_{or}$ ,其齐次坐标变换矩阵为:

$${}^L_T T = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{or})\text{Rot}(y, \Delta\beta_{or}) \quad (1)$$

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。即存在方位角误差 $\Delta\alpha_{oy}$ 和俯仰角误差 $\Delta\beta_{oy}$ ,相应齐次坐标变换矩阵表示为:

$${}^O_T T = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{oy})\text{Rot}(y, \Delta\beta_{oy}) \quad (2)$$

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 $\Delta\alpha_{oc}$ 、 $\Delta\beta_{oc}$ :

$${}^E_O T = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{oc})\text{Rot}(y, \Delta\beta_{oc}) \quad (3)$$

#### 2.2.2 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会产生回转误差和俯仰向光电编码器误差。 $\Delta\theta_{eh}$ 和 $\Delta\alpha_{eh}$ 为 $E_0$ 系统 $X_{E_0}$ 轴和 $Z_{E_0}$ 轴旋转的回转误差,俯仰向光电编码器误差: $\hat{\beta} = \beta + \Delta\beta = \beta + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2$ ,其中 $\beta$ 为俯仰角理想值, $\Delta\beta_1$ 为零位误差, $\Delta\beta_2$ 为测角误差; $E_0$ 系相对于 $A$ 系存在垂直度误差 $\Delta\alpha_{ec}$ 和 $\Delta\theta_{ec}$ :

$${}^{E_0}_E T = \text{Rot}(y, \hat{\beta})\text{Rot}(x, \Delta\theta_{eh})\text{Rot}(z, \Delta\alpha_{eh}) \quad (4)$$

$${}^A_{E_0} T = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{ec})\text{Rot}(x, \Delta\theta_{ec}) \quad (5)$$

#### 2.2.3 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会产生回转误差和方位向光电编码器误差。 $\Delta\theta_{ah}$ 和 $\Delta\alpha_{ah}$ 为 $A_0$ 系统 $X_{A_0}$ 轴和 $Z_{A_0}$ 轴旋转的回转误差,方位向光电编码器误差: $\hat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha = \alpha + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2$ ,其中 $\alpha$ 为方位角理想值, $\Delta\alpha_1$ 为零位误差, $\Delta\alpha_2$ 为测角误差; $A_0$ 系相对于 $B$ 系存在垂直度误差 $\Delta\beta_{ac}$ 和 $\Delta\theta_{ac}$ :

$${}^{A_0}_A T = \text{Rot}(z, \hat{\alpha})\text{Rot}(y, \Delta\beta_{ah})\text{Rot}(x, \Delta\theta_{ah}) \quad (6)$$

$${}^B_{A_0} T = \text{Rot}(y, \Delta\beta_{ac})\text{Rot}(x, \Delta\theta_{ac}) \quad (7)$$

根据多体系统理论与系统坐标系设定,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:

$${}^B_P = {}^B_{A_0} T {}^A_{A_0} T {}^A_{E_0} T {}^{E_0}_E T {}^E_O T {}^O_L T {}^L_T T P \quad (8)$$

式中： ${}^B p=[x, y, z, 1]^T$  为目标在基座坐标系  $B$  下的直角坐标， ${}^T p=[1, 0, 0, 1]^T$  为目标指向坐标系  $X_T$  轴单位指向向量。将公式(1)~(7)代入公式(8)展开得到光电探测系统指向误差模型，各项误差量  $\Delta$  均为极小值，即近似  $\cos\Delta=1, \sin\Delta=\Delta, \Delta_i\Delta_j=0$ ，由此指向误差模型线性化得：

$$\begin{cases} x=(\Delta\beta+\Delta\beta_{ah}+\Delta\beta_{oc}+\Delta\beta_{oy}+\Delta\beta_{ot})\cos\alpha\sin\beta- \\ (\Delta\alpha_{eh}+\Delta\alpha_{oc}+\Delta\alpha_{oy}+\Delta\alpha_{ot})\sin\alpha-(\Delta\alpha+\Delta\alpha_{ec}) \\ \sin\alpha\cos\beta+\cos\alpha\cos\beta-(\Delta\theta_{ah}+\Delta\theta_{ec})\sin\alpha\sin\beta- \\ \Delta\beta_{oc}\sin\beta \\ y=\sin\alpha\cos\beta+(\Delta\theta_{ah}+\Delta\theta_{ec})\cos\alpha\sin\beta- \\ (\Delta\beta+\Delta\beta_{ah}+\Delta\beta_{oc}+\Delta\beta_{oy}+\Delta\beta_{ot})\sin\alpha\sin\beta+ \\ ((\Delta\alpha_{eh}+\Delta\alpha_{oc}+\Delta\alpha_{oy}+\Delta\alpha_{ot})\cos\alpha+ \\ (\Delta\alpha+\Delta\alpha_{ec})\cos\alpha\cos\beta+\Delta\theta_{oc}\sin\beta \\ z=(\Delta\beta+\Delta\beta_{ah}+\Delta\beta_{oc}+\Delta\beta_{oy}+\Delta\beta_{ot})\cos\beta- \\ \sin\beta+\Delta\theta_{oc}\sin\alpha\cos\beta-\Delta\beta_{oc}\cos\alpha\cos\beta \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 应用最小二乘法辨识参数

如参考文献[9]所述，将直角坐标模型转换为指向误差分量模型。根据空间直角坐标与指向误差分量变换公式： $\tan(\alpha+\Delta\alpha)=\frac{y}{x}, \sin(\beta+\Delta\beta)=-z$ ，将公式(9)转换为方位角、俯仰角指向误差模型：

$$\begin{cases} \delta\alpha=(\Delta\alpha_{eh}+\Delta\alpha_{oc}+\Delta\alpha_{oy}+\Delta\alpha_{ot})\sec\beta+ \\ (\Delta\theta_{ah}+\Delta\theta_{ec})\tan\beta+\Delta\theta_{oc}\sin\alpha\tan\beta+ \\ \Delta\theta_{oc}\cos\alpha\tan\beta+(\Delta\alpha+\Delta\alpha_{ec})+\gamma \\ \delta\beta=(\Delta\beta+\Delta\beta_{ah}+\Delta\beta_{oc}+\Delta\beta_{oy}+\Delta\beta_{ot})- \\ \Delta\theta_{oc}\sin\alpha+\Delta\beta_{oc}\cos\alpha+\varphi \end{cases} \quad (10)$$

$$G_{\alpha}=[1, \sec\beta, \tan\beta, \sin\alpha, \tan\beta, \cos\alpha, \tan\beta, 0, 0, 0]^T \quad (11)$$

$$G_{\beta}=[0, \dots, 0, 1, \sin\alpha, \cos\alpha] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [b]=[\Delta\alpha+\Delta\alpha_{ec}, \Delta\alpha_{eh}+\Delta\alpha_{oc}, \Delta\alpha_{oy}+\Delta\alpha_{ot}, \\ \Delta\theta_{ah}+\Delta\theta_{ec}, \Delta\beta_{oc}, \Delta\theta_{oc}, \Delta\beta+\Delta\beta_{ah}+\Delta\beta_{oc}+ \\ \Delta\beta_{oy}+\Delta\beta_{ot}, -\Delta\theta_{oc}, \Delta\beta_{oc}]^T \end{aligned} \quad (13)$$

设  $G_{\alpha}, G_{\beta}, b$  如公式(11)、(12)、(13)所示，则  $\delta\alpha=[\delta\alpha_1, \delta\alpha_2, \dots, \delta\alpha_n]^T, \delta\beta=[\delta\beta_1, \delta\beta_2, \dots, \delta\beta_n]^T, G_{\alpha}=[G_{\alpha 1}, G_{\alpha 2}, \dots, G_{\alpha n}]^T, G_{\beta}=[G_{\beta 1}, G_{\beta 2}, \dots, G_{\beta n}]^T, \gamma=[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]^T, \eta=[\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$ ，指向误差线性模型可以表示为：

$$\delta=Gb+\eta \quad (14)$$

式中： $\delta=[\delta\alpha, \delta\beta]^T, G=[G_{\alpha}, G_{\beta}]^T, \eta=[\gamma, \varphi]$ 。 $S=Gb$  为指向误差修正模型，修正后残余误差：

$$\eta=\delta-S=\delta-Gb \quad (15)$$

运用最小二乘原理，为满足修正后残余误差  $\eta$

最小，即保证差值  $\delta-Gb$  的平方和  $\|\eta\|^2=\|Gb\|^2$  取到最小值，标定得到修正模型参数  $b$  的最小二乘估计值  $\hat{b}=(G^T G)^{-1} G^T \delta$ ，即：

$$\hat{b}=(G_{\alpha}^T G_{\alpha}+G_{\beta}^T G_{\beta})^{-1}(G_{\alpha}^T \delta_{\alpha}+G_{\beta}^T \delta_{\beta}) \quad (16)$$

综上，使用最小二乘法标定了修正模型参数  $\hat{b}$ ，代入公式(15)计算指向误差修正模型  $S$  与残余误差  $\eta$ ，提高了光电探测系统指向精度。

## 3 应用双线性插值的非参数模型标定

### 3.1 非参数模型标定

参数模型的建立需要对系统做出明确的假设，这些假设代表了很多额外的约束。实际情况下，考虑到各种误差组成差异与不确定因素，严格的线性模型并不多见，即参数模型在建立过程中都存在一定程度的线性化近似。这样实际情况和参数模型就存在一定的偏差，使用参数模型标定出的参数也就会与实际情况有偏差。

非参数模型的特点是系统模型的形式任意，自变量  $x_1, x_2, \dots, x_i$  和响应变量  $y$  的分布限制很少，避免了参数模型假设与实际情况有偏差的问题。如公式(17)所示非参数模型， $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$  为任意形式函数， $\varepsilon$  为随机误差。可见，非参数模型可以应对实际系统中线性与非线性的情况，对各种形式的实际系统都有一定的表现力。

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_i)+\varepsilon \quad (17)$$

然而，实际系统中，每个自变量对最终响应变量都有各自不同的作用。非参数模型标定过程中，每个自变量对响应变量的不同作用往往被忽略，非参数模型标定难以充分表现出某个显著影响因素对最终结果的作用。

### 3.2 双线性插值

光电探测系统工作状态下，方位角、俯仰角和指向误差空间对应关系表现为二维图像。二维图像的双线性插值<sup>[10]</sup>，效果比最临近插值好，计算量比三次样条插值、双三次插值小，复杂度低，在二维图像处理方面得到广泛应用。

使用双线性插值可以由网络节点样本插值得到矩形定义域内的插值函数，如图 2 所示，矩形网格各节点  $A, B, C, D$  为样本点，使用双线性插值，可以得到矩形  $ABCD$  内插值函数。

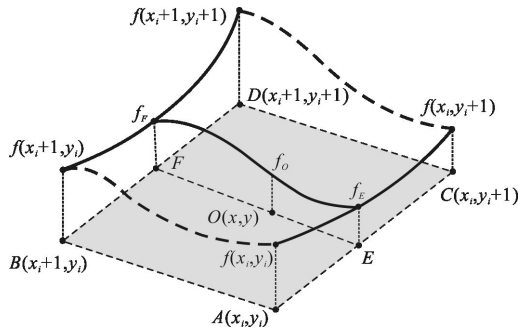


图 2 双线性插值原理图

Fig.2 Schematic diagram of bilinear interpolation

首先,分别对样本点 A、C 和 B、D 进行线性插值得到点 E、F 的插值函数值,然后对点 E、F 进行第二次线性插值得到点 O 的插值函数值:

$$f_E = \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} f(x_i, y_{i+1}) + \frac{y_{i+1}-y}{y_{i+1}-y_i} f(x_i, y_i) \quad (18)$$

$$f_F = \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} f(x_{i+1}, y_{i+1}) + \frac{y_{i+1}-y}{y_{i+1}-y_i} f(x_{i+1}, y_i) \quad (19)$$

$$f_O = f(x, y) = \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} f_F + \frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} f_E \quad (20)$$

把公式(18)、(19)代入公式(20),可以得到普遍适用的矩形区域内双线性插值函数:

$$f(x, y) = \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \left( \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} f(x_{i+1}, y_{i+1}) + \frac{y_{i+1}-y}{y_{i+1}-y_i} f(x_{i+1}, y_i) \right) + \frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \left( \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} f(x_i, y_{i+1}) + \frac{y_{i+1}-y}{y_{i+1}-y_i} f(x_i, y_i) \right) \quad (21)$$

光电探测系统各个误差影响因素差异很大,对系统指向误差的影响可能是线性的或是非线性的。鉴于此,考虑建立非参数模型来标定方位角、俯仰角与指向误差间的空间对应关系。以方位角、俯仰角为测量样本网格自变量,各网格节点指向误差为响应变量,根据公式(21)得到方位角、俯仰角矩形区域内插值函数,即指向误差修正模型。

## 4 标定实验与结果分析

### 4.1 标定实验

搭建实验平台如图 3 所示:①激光跟踪仪(Lerica MR 系列,精度 10 μm)、②光电探测平台、③光电探测控制系统、④数据采集系统。实验采集得到用于标定的 121 组系统方位角、俯仰角指向误差与 81 组用于验证修正模型的测量数据,如参考文献[11]附录表 1、表 2 所示。

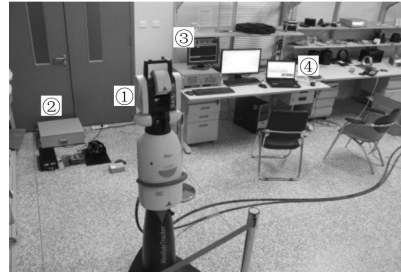


图 3 标定实验平台

Fig.3 Experimental platform of calibration

表 1 标定前后指向误差标准差

Tab.1 Standard deviation of pointing error before and after calibration

Calibration	Standard deviation	
	Azimuth	Elevation
Before calibration	21.652 2	15.174 4
Least square method	10.879 6	10.829 1
Bilinear interpolation	11.313 2	11.310 3

表 2 标定前后指向误差精度

Tab.2 Accuracy of pointing error before and after calibration

Calibration	Mean error/(")		Peak error/(")	
	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation
Before calibration	92.118 5	75.935 8	141.1	107
Least square method	2.555 1	2.617 1	22.111 8	19.559 8
Bilinear interpolation	3.378 5	3.409 6	27.862 5	27.775 0

### 4.2 运动学标定

针对参数模型标定算法,将参考文献[11]附录表 1 所示标定用数据代入公式(16),标定参数得:

$$b = [79.9", 10.9", -439.6", 76.8", 359.4", 17.0", 55.1", 58.6"] \quad (22)$$

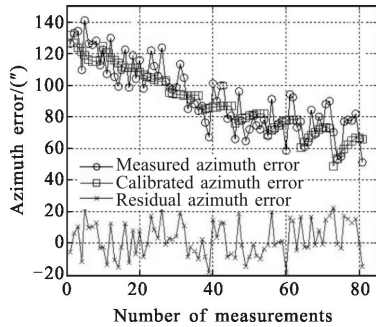
将参考文献[11]附录表 2 所示验证用数据与 b 代入公式(15),得到验证用指向误差修正值与残余误差。

针对非参数模型标定算法,将文献[11]附录表 1 所示网格点数据代入公式(21),得各矩形网格内修正

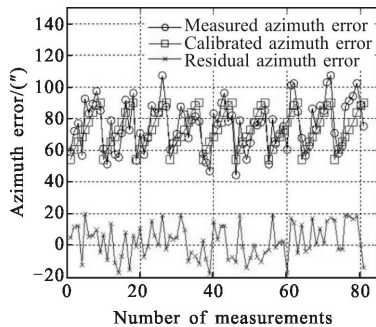
模型。将参考文献[11]附录表 2 所示验证用数据( $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ )代入各修正模型得到指向误差修正值,与表 2 所示原始指向误差相比较。

### 4.3 试验结果分析

如图 4 所示,为应用最小二乘法的参数模型标定前后方位角、俯仰角指向误差折线图。标示出了每个验证数据点指向误差原始值、修正值和修正后残余指向误差。



(a) 方位角指向误差  
(a) Azimuth pointing error

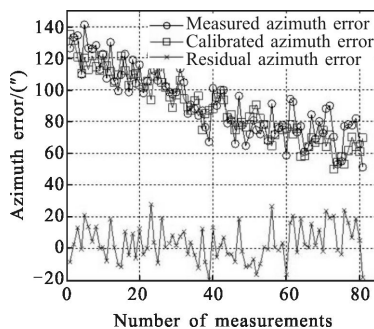


(b) 俯仰角指向误差  
(b) Elevation pointing error

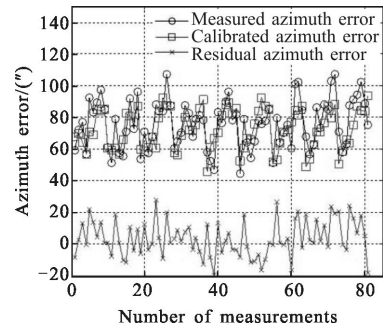
图 4 参数模型标定指向误差折线图

Fig.4 Line graph of pointing error with parametric model calibration

如图 5 所示,为应用双线性插值的非参数模型



(a) 方位角指向误差  
(a) Azimuth pointing error



(b) 俯仰角指向误差

(b) Elevation pointing error

图 5 非参数模型标定指向误差折线图

Fig.5 Line graph of pointing error with non-parametric model

calibration

标定前后方位角、俯仰角指向误差折线图。双线性插值算法拟合的指向误差修正值逼近原始指向误差值,计算得修正后残余指向误差,达到修正系统指向误差的目的。

将所有残余误差与原始误差相比较,得到标定前后指向误差标准差如表 1 所示。标准差的大小表现了指向误差的稳定性,可以看出修正后系统指向精度稳定性有很大提高。如表 2 所示,为标定前后指向误差均值与峰值比较,可以看出修正后的光电探测系统指向精度有了大幅提高。

## 5 结论

(1) 应用参数模型标定算法,指向精度从 141.1" 提高到 22.2"。应用非参数模型标定算法,指向精度从 141.1" 提高到 27.9"。参数模型标定的指向精度略好于非参数模型标定。

(2) 应用参数模型标定算法,指向误差标准差从 21.7 改善为 10.9。应用非参数模型标定算法,指向误差标准差从 21.7 改善为 11.4。参数模型标定的指向稳定性略好于非参数模型标定。

实验结果表明,两种标定算法对指向精度的提高都起到了很大作用,参数模型标定效果略好于非参数模型标定。在系统模型已知或易求解的情况下,使用参数模型标定算法可以获得更高的指向精度和稳定性。但是,参数模型标定建模过程复杂,计算量大,难以规避非线性误差的影响。在系统模型未知或模型复杂情况下,使用非参数模型标定方法省略建模过程,直接修正指向误差,过程简单,计算量小,能

明显提高精度，缺点是会忽略单个自变量对响应变量的独特影响。

参考文献：

- [1] Michael K M. Inertially stabilized platforms for optical imaging system [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2008, 28(1): 47-64.
- [2] Hyejin P, Namhyoung K, Jaewook L. Parametric models and non-parametric machine learning models for predicting price: Empirical compensation study over KOSPI 200 Index options [J]. *Expert System with Applications*, 2014, 41(11): 5227-5237.
- [3] Wang Jiaqi, Jing Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)  
王家琪, 金光, 严昌翔. 机载光电跟踪探测设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 105-116.
- [4] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection systems [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 32(11): 2042-2054. (in Chinese)  
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*, 2012, 32(11): 2042-2054.
- [5] Zhu Mingchao, Wang Tao, Jia Hongguang. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1556-1562. (in Chinese)  
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.
- [6] Zhao Ming, Bai Yang, Liu Hui, et al. Pointing error modeling and parameter calibration for seeker stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (S2): 374-379. (in Chinese)  
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(S2): 374-379.
- [7] Li Huajin, Zou Jian, Wang Wei, et al. Non-modeled camera calibration method and error analysis [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(10): 1406-1410. (in Chinese)  
李华晋, 邹剑, 王伟, 等. 非模型化相机标定方法及测角误差研究[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(10): 1406-1410.
- [8] Wang Jiaqi. System Design of Optical Instruments [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics CAS, 1998. (in Chinese)  
王家琪. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究生部, 1998.
- [9] Zhou Xiaoyao. Study on error analysis and correction of target location for electro-optical detection system [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2011. (in Chinese)  
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.
- [10] Chen Liang, Gao Chengmin. Fast discrete bilinear interpolation algorithm [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(15): 3787-3790. (in Chinese)  
陈良, 高成敏. 快速离散化双线性插值算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(15): 3787-3790.
- [11] 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. (in Chinese)  
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.