

## 基于粒子群算法的星敏感器光学误差标定方法

张 尧,王宏力,陆敬辉,何贻洋,姜 伟

(火箭军工程大学 控制工程系,陕西 西安 710025)

**摘 要:** 针对星敏感器光学误差两步法标定局部寻优能力强,但标定结果受初值影响大的问题,基于粒子群算法,提出一种改进的星敏感器光学误差参数标定方法。该方法首先利用粒子群算法全局搜索能力强的优点,为光学误差的两步法标定提供一组次优的初值条件,然后将其代入两步法中,得到标定值。仿真结果表明:该方法能够有效解决两步法标定受初值条件影响大的不足,并能够提高标定结果的稳定性。

**关键词:** 星敏感器; 光学误差; 粒子群算法; 两步法标定

**中图分类号:** V249.32+3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017002

## Calibration method of optical errors for star sensor based on particle swarm optimization algorithm

Zhang Yao, Wang Hongli, Lu Jinghui, He Yiyang, Jiang Wei

(Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the calibration result of two-step calibration method for star sensor optical error depends on the initial value too much, a modified calibration method was proposed based on particle swarm optimization (PSO) algorithm. Taking advantage of the global searching ability of PSO algorithm, a set of suboptimal initial value for two-step calibration of optical errors was provided via optimization. In sequence, the two-step calibration method was utilized to obtain the final calibration result. Numerical simulations demonstrate the effectiveness of the proposed method in overcoming the shortages that two-step calibration method is heavily influenced by initial values as well as the improvement of the stability of the calibration.

**Key words:** star sensor; optical error; particle swarm optimization algorithm; two-step calibration

收稿日期:2017-02-10; 修订日期:2017-03-20

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM2-6107)

作者简介:张尧(1994-),男,硕士生,主要从事组合导航、星敏感器等方面的研究。Email: bostics@qq.com

导师简介:王宏力(1965-),男,教授,博士,主要从事组合导航、星敏感器等方面的研究。Email:wanghongli\_1965@163.com

## 0 引言

星敏感器是目前使用的高精度姿态测量仪器之一,光学误差是星敏感器误差因素中的主要内部误差参数,严重影响星敏感器的测量精度。因此为提高星敏感器的测量精度,对星敏感器光学误差进行标定是必不可少的环节。

待定系数标定模型和内参数标定模型是两种常用的误差标定模型,待定系数标定模型由于其应用的局限性,在弹载星敏感器误差标定中应用并不广泛,内参数标定模型存在标定时间长、标定过程繁琐复杂的缺点。关于星敏感器光学误差标定的研究中,较常见的是基于星间角距不变原理和最小二乘原理的综合标定方法。如陆敬辉、王宏力等人在详细分析星敏感器典型误差的基础上,基于星间角距不变原理,采用递推最小二乘法实现参数标定且达到了较高的精度<sup>[1]</sup>;王洪涛、罗长洲等人根据所建立的光学误差传递模型,在实测校准数据的基础上,采用最小二乘法求解模型参数,完成星敏感器光学误差参数的标定,并达到较高的精度<sup>[2]</sup>。基于最小二乘方法的焦距及主点偏差标定方法的优点是简单快速,稳定性好。但该方法不能消除光学畸变对焦距等参数的标定带来的影响,且该方法只能标定焦距和主点两项参数,不能标定光学畸变参数。

刘海波、王文学等人提出了一种基于星角距正弦值的改进的星敏感器光学误差参数的估计方法<sup>[3]</sup>。该标定方法采用两步迭代优化的方法,在估计主点和焦距的同时,对光学畸变参数进行了标定。两步法能够有效解决内参数标定方法存在的问题,采用迭代寻优的方法也提高了标定精度。但存在受初值影响大,鲁棒性差的缺点,这在一定程度上制约了标定精度的进一步提高。文中将重点分析两步法存在的不足,并基于粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对两步法进行完善,以提高光学误差标定精度。

## 1 光学误差两步法标定原理

根据星敏感器的理想成像模型,不考虑星敏感器的测量噪声和光学畸变,成像平面上的第  $i(1, \dots, N)$  颗恒星像点坐标为  $(x_i, y_i)$ , 对应的测量矢量可以表

示为:

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - c_x) \\ -(y_i - c_y) \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

导航星表中与之对应的第  $i(1, \dots, N)$  颗导航星赤经和赤纬坐标为  $(\alpha_i, \delta_i)$ , 参考矢量可表示为:

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于星角距正交变换不变的原理,恒星  $i, j$  在星敏感器坐标系中的方向矢量  $w_i, w_j$  的夹角与相对应的天球坐标系中的位置矢量  $v_i, v_j$  的夹角相等<sup>[4]</sup>。根据这一原理,可以利用夹角的余弦值或者正弦值相等的特点,建立如下的关系式:

$$\cos \theta_{ij} = v_i^T v_j = w_i^T w_j \quad (3)$$

$$\sin \theta_{ij} = |v_i \times v_j| = |w_i \times w_j| \quad (4)$$

一般情况下,由于星角距的余弦值的计算相对简单,因而被广泛应用于星敏感器的误差标定中。在小角度的情况下,由于正弦值比余弦值对角度微小的变化更加敏感,因而利用正弦值的方法将具有更高的精度<sup>[5]</sup>。

将公式(1)代入公式(4),得到:

$$|v_i \times v_j| = F_{ij} = \frac{N_{ij}}{D_i D_j} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} N_{ij} = \sqrt{f^2 (x_i - x_j)^2 + f^2 (y_i - y_j)^2 + \Theta} \\ D_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2} \\ D_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + f^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Theta = [(x_i - x_0)(y_i - y_0) - (x_j - x_0)(y_j - y_0)]^2$  上述星敏感器的标定模型中,没有考虑光学畸变这一误差因素,考虑到光学畸变对星点位置误差的影响,公式(6)应修正为:

$$\begin{cases} N_{ij} = \sqrt{f^2 (x'_i - x'_j)^2 + f^2 (y'_i - y'_j)^2 + \Theta} \\ D_i = \sqrt{(x'_i - x_0)^2 + (y'_i - y_0)^2 + f^2} \\ D_j = \sqrt{(x'_j - x_0)^2 + (y'_j - y_0)^2 + f^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x'_i = x_i - \delta x_i, y'_i = y_i - \delta y_i, x'_j = x_j - \delta x_j, y'_j = y_j - \delta y_j, (\delta x, \delta y)$  为星点位置  $(x, y)$  处的光学畸变量<sup>[6]</sup>。

理想情况下的星间角距  $\theta_{ij}$  与实际情况下的星间角距  $\hat{\theta}_{ij}$  的方向余弦之间偏差  $S_{ij}$  可以表示为:

$$S_{ij} = |v_i \times v_j| - F_{ij}(c_x^g, c_y^g, f^g) \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{ij}}{\partial c_x} & \frac{\partial F_{ij}}{\partial c_y} & \frac{\partial F_{ij}}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c_x \\ \Delta c_y \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (8)$$

由  $(i=1,2,\dots,n-1), (j=i+1,\dots,n)$  和  $(i \neq j)$  及公式(8)可得:

$$S = B \Delta \Phi \quad (9)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{12}}{\partial c_x} & \frac{\partial F_{12}}{\partial c_y} & \frac{\partial F_{12}}{\partial f} \\ \frac{\partial F_{13}}{\partial c_x} & \frac{\partial F_{13}}{\partial c_y} & \frac{\partial F_{13}}{\partial f} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{n-1,n}}{\partial c_x} & \frac{\partial F_{n-1,n}}{\partial c_y} & \frac{\partial F_{n-1,n}}{\partial f} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} S_{12} \\ S_{13} \\ \vdots \\ S_{n-1,n} \end{bmatrix}, \Delta \Phi = \begin{bmatrix} \Delta c_x \\ \Delta c_y \\ \Delta f \end{bmatrix}.$$

根据最小二乘法可以得到:

$$\Delta \Phi_k = (B_k^T B_k)^{-1} B_k^T S_k \quad (10)$$

因此有:

$$\Delta \Phi_{k+1} = \Phi_k + \Delta \Phi_k \quad (11)$$

式中:  $\Phi_k = [c_x, c_y, f]_k^T, \Delta \Phi_k = [\Delta c_x, \Delta c_y, \Delta f]_k^T$ , 下面推导畸变系数  $q_1$  的计算方法。

记由光学畸变产生的星点位置偏差为  $\delta x, \delta y$ , 则有以下关系式成立:

$$\delta x = x_{gi} - x_i = q_1 x_i r^2 + q_2 x_i r^4 + q_3 x_i r^6 + \dots \quad (12)$$

$$\delta y = y_{gi} - y_i = q_1 y_i r^2 + q_2 y_i r^4 + q_3 y_i r^6 + \dots \quad (13)$$

取公式(12)、(13)的一次项, 得到光学畸变的近似公式如下:

$$\delta x = x_{gi} - x_i \approx q_1 x_i r^2 \quad (14)$$

$$\delta y = y_{gi} - y_i \approx q_1 y_i r^2 \quad (15)$$

式中:  $r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ ,  $(x_i, y_i)$  为理想星点坐标。  $q_1, q_2, q_3, \dots$  为径向畸变系数。由公式(14)、(15), 径向光学畸变计算公式可改写为以下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} (x_i - x_0) [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2] \\ (y_i - y_0) [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2] \end{bmatrix} q_1 = \begin{bmatrix} x_{gi} - x_i \\ y_{gi} - y_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  是理想星点位置坐标;  $(x_{gi}, y_{gi})$  是考虑畸变的实际星点位置坐标。

不妨假设有  $m$  个星点的位置, 那么根据公式(4)、(19)可以得到以下关系:

$$D q_1 = d \quad (17)$$

$$\text{其中, } D = \begin{bmatrix} (x_1 - x_0) [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2] \\ (y_1 - y_0) [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2] \\ \vdots \\ (x_m - x_0) [(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2] \\ (y_m - y_0) [(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2] \end{bmatrix},$$

$$d = [x_{g1} - x_1, y_{g1} - y_1, \dots, x_{gm} - x_m, y_{gm} - y_m]^T.$$

由最小二乘法对公式(17)进行求解, 可得一阶径向畸变系数  $q_1$  为:

$$q_1 = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (18)$$

基于上述标定数学模型, 提出一种改进的基于星间角距正弦值的参数估计方法, 并以此估计星敏感器光学误差参数。该方法采用两步迭代优化的思路, 对光学畸变进行标定, 具体步骤如下:

Step1: 令畸变系数  $q_1$  值为 0, 利用最小二乘法对星敏感器焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$  进行标定;

Step2: 将步骤 Step1 中获得的焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$  作为输入值, 利用最小二乘法计算畸变系数  $q_1$ ;

Step3: 将步骤 Step2 获得的畸变系数  $q_1$  作为输入值, 利用最小二乘优化焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$ 。

对步骤 Step2 和步骤 Step3 进行若干次迭代, 以获得稳定的星敏感器光学误差参数的标定值。算法流程如图 1 所示。

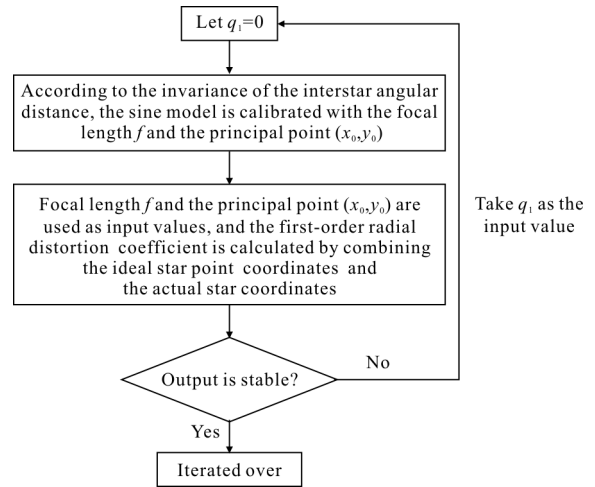


图 1 两步法标定的流程图

Fig.1 Flow chart of two-step calibration

光学误差两步法标定方法优缺点分析:

(1) 两步法利用正弦值建立观测方程,相比余弦值,正弦值对小角度变化更加敏感,有利于提高标定精度;

(2) 两步法采用迭代寻优的方法能够同时标出主点、焦距和畸变系数等主要光学系统参数,达到了一体化快速标定的要求;

(3) 两步法标定利用正弦值建立观测方程,由于需要计算恒星对方向矢量的叉乘,计算量较大,算法的实时性较差。适合于对实时性要求不高的地面标定;

(4) 两步法标定仍是基于最小二乘理论,因此,该方法也存在着对初值的依赖较大的问题,算法的鲁棒性因此也会受到影响。

## 2 基于 PSO 算法的改进两步法标定方法

为了克服两步法标定方法存在的对初值依赖较大等问题。文中对两步法标定进行改进,基于粒子群算法的全局搜索能力较强,但可能陷入局部极小的特点,利用 PSO 算法求取一组较优解作为两步法标定方法的初值,而后将初值代入两步法迭代优化得到最终的误差参数估计值。

为解决该问题,笔者首先对 PSO 算法的原理做简单介绍:设在一个  $n$  维的搜索空间中, $m$  个粒子组成的种群  $X=\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ ,其中第  $i$  个粒子位置为  $x_i=\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}^T$ ,其速度为  $v_i=\{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\}^T$ 。它的个体极值为  $P_i=\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}^T$ ,种群的全局极值为  $P_g=\{p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn}\}^T$ 。按照追随当前最优粒子的原理,粒子  $x_i$  将按以下两式改变位置和速度。

$$v_{id}^{(t+1)}=v_{id}^{(t)}+c_1 r_1 (p_{id}^{(t)}-x_{id}^{(t)})+c_2 r_2 (p_{id}^{(t)}-x_{id}^{(t)}) \quad (19)$$

$$x_{id}^{(t+1)}=x_{id}^{(t)}+v_{id}^{(t+1)} \quad (20)$$

式中: $d=1,2, \dots, n, i=1,2, \dots, m, m$  为种群规模; $t$  为当前进化代数; $r_1, r_2$  为  $[0,1]$  上均匀分布的随机数; $c_1, c_2$  为加速常数。另外,考虑到粒子速度应在合理范围内,分别可设定速度上限  $V_{\max}$  和速度下限  $-V_{\max}$ ,即当  $v_{id}^{(t)} > V_{\max}$  时,取  $v_{id}^{(t)} = V_{\max}$ ;当  $v_{id}^{(t)} < -V_{\max}$  时,  $v_{id}^{(t)} = -V_{\max}$ 。在公式(19)中的第 1 部分为粒子“旧”速度部分;第 2 部分是“认知”部分,表示粒子自身的思考;第 3 部分为“社会”部分,表示粒子之间的信息共享与合作。

标定过程分为两部分:(1) 利用 PSO 算法为两步法标定获得一组合适的初值。(2) 将初值代入两步法中,求解得到光学误差参数的估计值。

PSO 算法获取两步法初值的步骤如下:

(1) 初始种群的产生

首先需明确星敏感器各项误差参数的取值范围,焦距  $f$ ,主点  $(c_x, c_y)$  的取值范围可以根据星敏感器的具体情况获得。畸变系数在两步法中单独考虑,故在此不做考虑。并设置算法参数  $c_1, c_2, r_1, r_2$  等值,初始种群可设为:

$$Q^0 = \{q_1^0, \dots, q_i^0, \dots, q_m^0\} \quad (21)$$

式中:粒子  $q_i^0$  的位置为  $(c_{xi}^0, c_{yi}^0, f_i^0)^T$ ,随机产生粒子  $x_i$  的初始速度  $(v_1^0, v_2^0, v_3^0)^T$ 。

(2) 计算适应度函数

适应度函数实质上是目标优化函数,星敏感器误差参数标定的目的即通过标定误差参数,进行误差补偿使星点实际坐标  $(x'_j, y'_j)$  与星点理想坐标  $(x_j, y_j)$  之间的误差尽量小<sup>[7]</sup>。因此,定义适应度函数如下:

$$f(q_i) = \frac{\sum_{j=1}^M \sqrt{(x'_j - x_j)^2 + (y'_j - y_j)^2}}{M} \quad (22)$$

式中: $f(q_i)$  为粒子  $q_i$  的适应度函数值; $M$  为星点个数。

(3) 对粒子进行评价和更新。

分别将粒子当前值计算得到的适应度函数值与自身最优值和全局最优值进行比较,如果粒子当前值的适应度函数值比自身最优值更优,则粒子当前值替代成为新的自身最优值,类似的,粒子当前值的适应度函数值比全局最优值更优,则粒子当前值替代成为新的全局最优值。按照公式(19)和公式(20)更新粒子的位置和速度,产生新的种群。

(4) 判断算法终止条件

算法终止条件为,达到寻优最大进化代数  $T_{\max}$ ,或者粒子的适应度函数值小于给定精度。这两个条件满足其一,算法终止。

粒子群算法的流程图如图 2 所示。利用粒子群算法获得两步法所需的初值  $(\hat{c}_x, \hat{c}_y, \hat{f})$ ,将其代入两步

法中,最终解算得到主点、焦距、畸变系数的标定值。

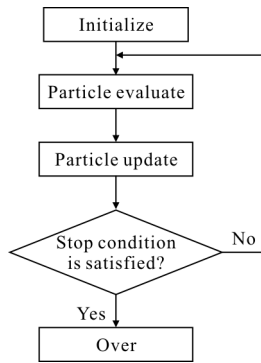


图 2 粒子群算法的流程图

Fig.2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

### 3 仿真实验与结果分析

#### 3.1 实验条件设置

文中仿真实验中星敏感器的参数设置如下。在仿真实验中,主点的标准值设为  $c_x=1.00\text{ mm}$ ,  $c_y=$

1.00 mm, 相关参数误差根据不同型号的星敏感器实际加工、装配、测量及经验进行设计,具体如下:焦距误差一般在 2%以内,主点偏差一般不超过 10 个像素点,镜头的一阶畸变系数设为:  $q_1 \leq 5 \times 10^{-4}$ 。在该仿真实验中,设主点偏差为 10 个像素点,焦距误差为 2%,则主点的真实值为(1.15,1.15)(单位: mm),焦距真实值为 44.43 mm。畸变的真实值设置为  $5 \times 10^{-4}$ 。为消除误差耦合对标定结果带来的影响,基于 3.3.2 仿真实验的结论,在该仿真实验中,星光入射角取值范围均在导航星入射角阈值  $\beta_{\max}$  范围内。

#### 3.2 两步法标定仿真结果

为验证两步法标定受算法的初始参数设置影响较大,在仿真试验中,设置了 20 组不同的初始参数,迭代次数设置为 40 次,以观察初始参数的变化对标定结果造成的影响。仿真结果如表 1 所示,仿真图分别如图 3~5 所示。

表 1 不同初值条件下两步法标定结果

Tab.1 Calibration results of two-step method under different initial conditions

Serial number	Initial condition			Calibration results			
	X-axis principal point position/mm	Y-axis principal point position/mm	Focus values/mm	X-axis principal point position/mm	Y-axis principal point position/mm	Focus values/mm	First-order radial distortion coefficient/ $10^{-4}$
1	0.50	0.50	42.50	1.178 2	1.165 7	43.585 0	4.446 0
2	0.55	0.55	42.60	1.189 1	1.176 5	43.591 9	4.458 4
3	0.60	0.60	42.70	1.160 0	1.207 1	43.579 4	4.475 1
4	0.65	0.65	42.80	1.176 0	1.190 8	43.584 6	4.470 1
5	0.70	0.70	42.90	1.175 0	1.207 8	43.566 7	4.466 2
6	0.75	0.75	43.00	1.181 2	1.169 8	43.608 4	4.468 6
7	0.80	0.80	43.10	1.201 2	1.166 0	43.594 3	4.472 5
8	0.85	0.85	43.20	1.198 5	1.187 7	43.604 8	4.479 3
9	0.90	0.90	43.30	1.184 7	1.171 0	43.561 4	4.474 8
10	0.95	0.95	43.40	1.203 5	1.196 6	43.599 6	4.461 1
11	1.00	1.00	43.50	1.209 4	1.195 5	43.562 0	4.476 0
12	1.05	1.05	43.60	1.169 6	1.203 2	43.594 6	4.471 4
13	1.10	1.10	43.70	1.198 2	1.186 1	43.602 6	4.476 8
14	1.15	1.15	43.80	1.167 8	1.190 1	43.568 9	4.451 3
15	1.20	1.20	43.90	1.192 7	1.167 3	43.597 1	4.449 9
16	1.25	1.25	44.00	1.176 7	1.197 9	43.576 28	4.487 0
17	1.30	1.30	44.10	1.1898	1.170 1	43.586 0	4.478 7
18	1.35	1.35	44.20	1.197 0	1.210 3	43.584 1	4.475 0
19	1.40	1.40	44.30	1.184 9	1.205 1	43.581 7	4.457 4
20	1.45	1.45	44.40	1.189 3	1.197 4	43.604 6	4.478 5

由表 1 的仿真结果和仿真结果图 3~5 可以得出:

初值条件设置的不同, 利用两步法标定得到的光学误差结果相差较大, 这表明在面对星敏感器光学误差这种多参数、非线性的复杂问题时, 两步法标定确实受初值条件设置的影响较大, 标定结果不稳定, 易陷入局部最优解, 标定结果的可靠性因此降低, 算法的鲁棒性较差<sup>[8]</sup>。

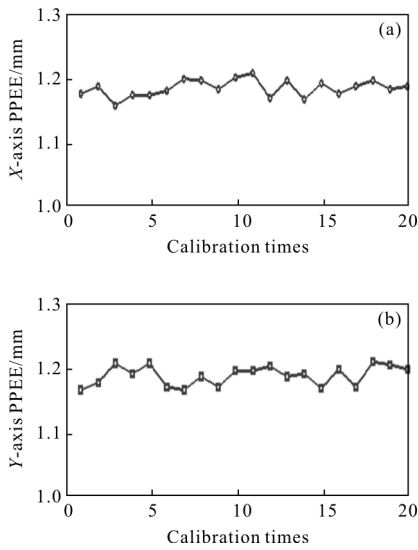


图 3 X 轴、Y 轴主点误差估计值曲线图  
Fig.3 Curves of X-axis and Y-axis principal point error estimations

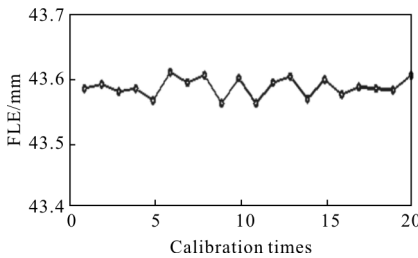


图 4 焦距估计值曲线图

Fig.4 Curves of focal length estimations

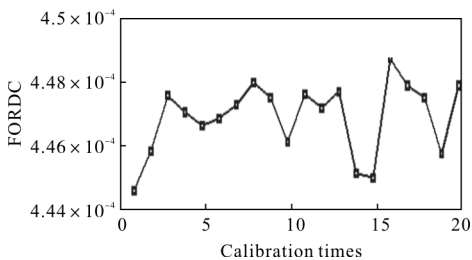


图 5 一阶径向畸变系数曲线图

Fig.5 Curves of first-order radial distortion coefficient

### 3.3 基于 PSO 算法的改进两步法仿真

为了验证粒子群算法获取两步法标定初值的有效性和优点, 进行该仿真实验。在进行实验时, 将 PSO 算法的寻优最大迭代次数设置为 400, 粒子的适应度函数的精度阈值设置为  $10^{-3}$ , 即适应度函数小于  $10^{-3}$  时迭代终止。仿真结果如图 6、7 所示。

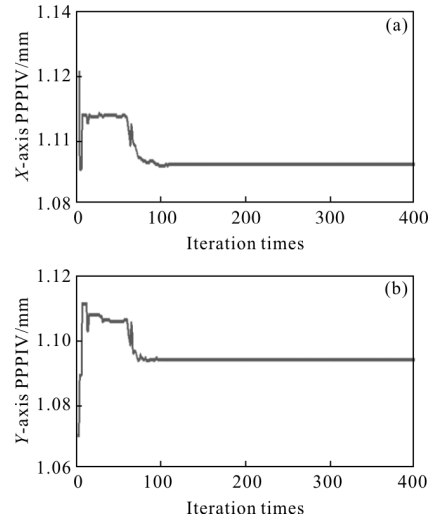


图 6 粒子群算法计算 X 轴和 Y 轴主点位置初值  
Fig.6 X-axis and Y-axis principal point position initial values for PSO algorithm

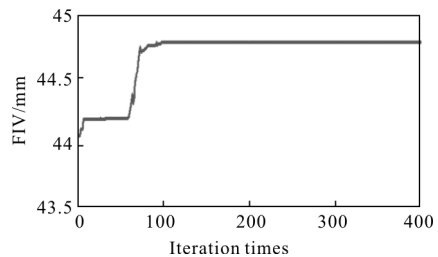


图 7 粒子群算法计算焦距初值

Fig.7 Focus initial values for PSO algorithm

采用粒子群算法的结果分析如下:

由图 6、7 可以看出, 利用粒子群算法计算两步法标定的初值条件的结果在迭代 115 次左右之后趋于稳定, 主点参数初值为(1.09,1.09)(单位:mm), 焦距初值为 44.78 mm。这与仿真条件设置中的主点和焦距真实值比较接近, 在精度要求不高的情况下, 可作为标定结果输出, 可见粒子群算法具有全局搜索能力, 找到了一组接近真实值的次优解, 以此作为两步法标定的初值, 有利于提高两步法标定结果的精度, 增强算法的鲁棒性。

在利用粒子群算法为两步法标定提供一组合适的初值后,将初值代入两步法算法中,得到仿真结果如图 8~10 所示。

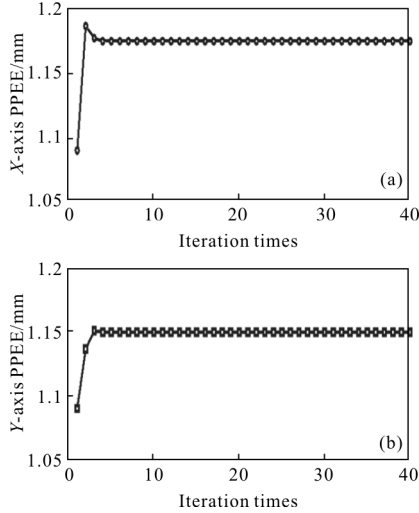


图 8 基于粒子群算法的两步法标定 X 轴和 Y 轴主点误差估计值

Fig.8 Two-step calibration of X-axis and Y-axis principal point error estimations based on PSO

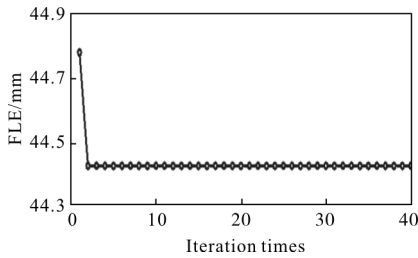


图 9 基于粒子群算法的两步法标定焦距估计值

Fig.9 Two-step calibration of focal length estimations based on PSO

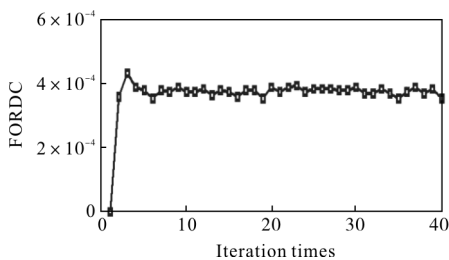


图 10 基于粒子群算法的两步法标定一阶畸变系数估计值

Fig.10 Two-step calibration of first-order radial distortion coefficient based on PSO

基于粒子群算法的两步法标定结果为: 主点标定结果(1.138 0, 1.128 5)(单位: mm), 焦距标定结果 44.429 0 mm, 一阶畸变系数标定结果为  $3.580 5 \times 10^{-4}$ , 标定结果与仿真实验中设置的参数真实值相

比,主点标定精度分别为 0.012 mm、0.021 5 mm, 焦距标定精度为 0.01 mm, 畸变系数精度为  $1.419 5 \times 10^{-4}$ 。可见,相比于直接两步法标定方法,文中提出的基于粒子群算法的改进两步法利用粒子群算法全局搜索能力强的特点提供一个较好的初值,将初值代入两步法中,由于两步法具有局部寻优特点,因此可获得最终精度较高的标定结果。

#### 4 结论

文中结合星敏感器在导弹上应用的背景,分析了光学误差两步法标定方法的不足,提出了一种基于粒子群算法的改进两步法标定方法。该方法充分利用了粒子群算法的全局搜索、计算速度快以及两步法局部寻优能力强的特点,将粒子群算法用于全局搜索,为两步法提供一个次优解,即合适的初值,并将其代入两步法中计算标定结果。仿真结果表明文中方法能一次性将主点误差、焦距和一阶畸变系数这三个参数标定出来,并得到最终精度较高的标定结果,且该标定过程不依赖精密转台等昂贵的外部设备,具有良好的可操作性。

#### 参考文献:

- [1] Lu Jinghui, Wang Hongli, Wen Tao, et al. Error calibration method for star sensor[C]//2011 2nd International Conference on Information, Networking and Automation, 2011: 98-101.
- [2] Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu, et al. Star sensor model parametric analysis and calibration method study[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(6): 880-885. (in Chinese)
- [3] Liu Haibo, Wang Wenxue, Chen Shengyi, et al. Star tracker ground calibration based on the invariant of interstar angles [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36 (6): 48-52. (in Chinese)
- [4] Griffith D T, Singla P, Junkins J L. Autonomous on-orbit calibration of approaches for star tracker cameras [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2002, 11(2): 39-57.
- [5] He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao, et al. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1-7. (in Chinese)
- [6] Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan, Zhang Guangjun. Selection of star sensor lens aberration model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 665-670. (in Chinese)

- [7] Dong Fang. Researches on particle swarm optimizer and its applications in dynamic optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [8] Qiao Xing, Wang Hongli, Wang Yongsheng, et al. Parameter calibration of star sensor based on GA-LM fusion algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 47(11): 1224-1229. (in Chinese)
- [9] Sun Li, Jiang Jie, Li Jian, Ji Feilong. Structural parameter calibration method for multiple field of view star tracker [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(8): 1532-1538. (in Chinese)
- [10] He Yiyang, Wang Hongli, Lu Jinghui, et al. Optical distortion influence of WFOV star sensor on focal length calibration [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 23(1): 53-56. (in Chinese)
- [11] Liu Lei, Liu Ye, Cao Jianfeng, et al. A realtime on-orbit calibration method for integrated attitude determination by gyros/star sensors [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2014, 33(2): 152-157. (in Chinese)