

doi:10.3788/gzxb20144311.1112005

# 空间目标天文定位方法及观测分析

刘美莹, 王虎, 汶德胜, 冉晓强, 赵惠, 杨少东

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

**摘 要:** 研究并分析了一种加权最小二乘曲面法, 将其用于空间目标天文观测, 该方法不仅简单方便, 而且还能够用于高准确度、大数据量的天文定位. 通过实际星空观测, 对连续拍摄的星图进行分析计算, 结果表明, 拟合均方误差在赤经和赤纬方向均优于  $4''$ . 赤纬的定位准确度高于赤经的定位准确度, 在赤经与赤纬方向上的最大定位误差分别为  $5.13''$  和  $1.74''$ . 该方法降低了恒星位置误差对观测结果的影响, 剔除了定标星的偶然匹配误差, 提高了观测数据的利用率以及天文定位准确度, 在实际工作中有较高的应用价值.

**关键词:** 天文定位; 空间目标; 坐标变换; 加权最小二乘; 高准确度; 误差分析; 天文观测相机

中图分类号: V447

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1112005-8

## Celestial Positioning Method and Observation Analysis for Space Object

LIU Mei-ying, WANG Hu, WEN De-sheng, RAN Xiao-qiang, ZHAO Hui, YANG Shao-dong

(Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** A method based on weighted least squares surface fitting was studied, which was used for astronomical observation space target. This method can be used in celestial positioning of high-precision and large data quantity, and it is also very simple. Through observing the real sky, the star maps continuously were calculated. The results show that the fitting mean square errors are all less than  $4''$  in the direction of ascension and declination. The positioning accuracy in the direction of declination is better than that of ascension, the max positioning error of the observed stars are  $5.13''$  and  $1.74''$  in the direction of ascension and declination. It's demonstrated that the effects of star centroid errors are reduced, and the match up errors are also removed. The utilization of observed data and the precision of celestial positioning is improved. The method is well suited for application.

**Key words:** Celestial positioning; Space object; Coordinate transformation; Weighted least square; High precision; Error analysis; Astronomical camera

**OCIS Codes:** 120.3940; 000.4430; 100.3008; 110.2960; 000.3860

## 0 引言

空间目标天文定位方法可以实现对空间目标的高准确度定位, 对战略信息的获取具有重要意义<sup>[1]</sup>. 利用观测设备对空间目标进行天文定位, 再利用观测量进行批量最小二乘归算<sup>[2]</sup>, 最终可以确定空间目标的位置. 空间目标天文定位目前主要采用地基观测方式, 与天基观测方式相比, 地基观测的参考系建立在恒星参考系基础上, 具有直接、自然、可靠的优点. 尽管现代定

位手段越来越丰富准确—比如 GPS 系统, 基于天文方式的测量定位技术依然有其无可比拟的优越性, 即自主性. 地基天文观测定位不依赖于任何其他外部系统, 可以不与外界交换信息, 不受其它系统干扰, 自主工作, 无误差积累, 这在国防建设中显得极其重要, 是国防武器装备必备的定位方式<sup>[3]</sup>. 因此, 对空间目标的天文定位方法展开研究非常必要.

空间目标天文定位是利用 CCD 天文观测相机在凝视成像模式下拍摄系列星图, 进行星点提取和星图

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61107008 资助)

第一作者: 刘美莹(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为天文定位、星图识别. Email: liumeiying@opt.ac.cn

导师: 汶德胜(1965—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电信息高速处理. Email: VEN@opt.ac.cn

收稿日期: 2014-04-25; 录用日期: 2014-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

匹配,计算得到 CCD 本体坐标系到天球坐标系的位置转换矩阵,再结合目标在相机 CCD 面上的坐标位置,便可获取目标相对恒星的位置信息<sup>[4]</sup>.要实现快速高准确度的天文定位,需要同时观测多个天体的信息,并利用处理设备解算得到观测目标的位置<sup>[5-6]</sup>.

本文研究分析了一种加权最小二乘曲面法,将其用于空间目标天文定位,可同时处理多星观测信息.其基本过程是确定观测天体分别在天球坐标系和 CCD 本体坐标系中的位置,并利用加权最小二乘曲面法求得两坐标系之间的位置转换矩阵,根据该转换矩阵即可求得观测目标的位置信息.

## 1 天文定位方法

### 1.1 天文定位原理

空间目标天文定位实现过程如图 1,利用 CCD 天文观测相机对空间目标及背景恒星拍摄系列星图,信息处理器对拍摄的每帧图像进行星图匹配并计算得到天球坐标系到 CCD 本体坐标系的位置转换矩阵  $M$ ,同时对连续拍摄的每一组星图进行目标检测,得到空间目标在 CCD 面上的位置坐标,最后计算得到空间目标的位置信息(赤经和赤纬).

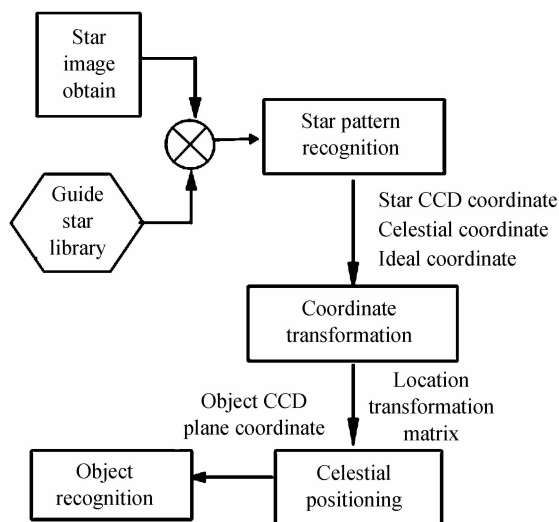


图 1 天文定位流程图

Fig. 1 Flow chart of celestial position

空间目标的天文定位,其位置转换矩阵的获取方法与星敏感器的转换矩阵获取方法类似,根据美国 HDOS 公司提供的相关数据研究,对于空间目标天文定位方式,空间目标视位置的整体准确度水平由赤经和赤纬的准确度决定.本文在传统星敏感器天文标定的最小二乘法的基础上,使用加权最小二乘曲面法应用于 CCD 天文相机观测的天文定位<sup>[7]</sup>.因天文定位是一种相对定位的方法,具体计算时,引入一中间坐标系——定义在切平面上的理想坐标系,其坐标  $(\xi, \eta)$  与 CCD 本体坐标系上的位置坐标  $(x, y)$  存在一一对应的

关系<sup>[8]</sup>.理想情况下,使用星位角与像元比例尺即可换算,同时,理想坐标系  $(\xi, \eta)$  与天球坐标系  $(\alpha, \delta)$  间存在如下对应关系

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)} \\ \eta = \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 - \cos \delta \cos \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $(\alpha_0, \delta_0)$  为 CCD 图像中心对应的天球坐标.若已知理想坐标  $(\xi, \eta)$ ,天球坐标系  $(\alpha, \delta)$  的计算方法为

$$\begin{cases} \tan (\alpha - \alpha_0) = \frac{\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \\ \tan \delta = \frac{(\eta \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \cos (\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \end{cases} \quad (2)$$

实际工作中,由于相机光学系统、算法以及星表等因素影响, CCD 本体坐标系与天球坐标系间的关系无法精确推导,一般使用多项式近似回归方法<sup>[9-10]</sup>.本文使用两个曲面方程拟合星点在 CCD 平面坐标与天球坐标系之间的关系,即

二次多项式

$$\alpha = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \quad (3)$$

$$\delta = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 \quad (4)$$

三次多项式

$$\alpha = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 y^3 \quad (5)$$

$$\delta = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 xy^2 + b_9 y^3 \quad (6)$$

### 1.2 加权最小二乘法

最小二乘法的求解方程可表示为

$$g = g_0(x, y) + \sum_{k=1}^m a_k f_k(x, y) \quad (7)$$

式中  $a_k$  待求解的未知参量.将  $N$  组观测值  $(x_i, y_i)$  代入式(7),根据最小二乘算法可知,加权最小二乘估计解为<sup>[11]</sup>

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = (\bar{F}^T \bar{W} \bar{F})^{-1} \bar{F}^T \bar{W} (\bar{g} - \bar{g}_0) \quad (8)$$

式中

$$\bar{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_N \end{bmatrix}, \bar{g}_0 = \begin{bmatrix} g_0(x_1, y_1) \\ g_0(x_2, y_2) \\ \vdots \\ g_0(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, y_1) & f_2(x_1, y_1) & \cdots & f_m(x_1, y_1) \\ f_1(x_2, y_2) & f_2(x_2, y_2) & \cdots & f_m(x_2, y_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(x_N, y_N) & f_2(x_N, y_N) & \cdots & f_m(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

权矩阵  $\bar{W}$  为

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} \omega_1 & & & & O \\ & \omega_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ O & & & & \omega_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中  $\omega_i$  为观测值  $g_i$  得权重因子。

若为三次曲面拟合,求得  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_9$ , 即得到了  $\alpha$  的拟合函数( $\delta$ 类似),也就得到了星体的位置转换矩阵。

由文献[11]可知,最小二乘估计不必考虑估计误差的协方差矩阵,而对于加权最小二乘估计,则考虑了估计误差的协方差矩阵,所获得的先验信息将更多,估计的准确度将会比最小二乘估计更高。

对于权重因子的选择依据是:它应使各测定点具有适当的权重,由此算得的曲面应尽可能使各点测量值的相对误差都符合规范的要求<sup>[11]</sup>。常采用的方法是令  $W$  与测量值的误差成反比,即

$$W_i = 1/Y_i^2 \quad (12)$$

## 2 算法及误差分析

分析算法的拟合误差,首先研究确定加权最小二乘曲面法的误差公式,然后应用实验数据和相应的误差公式分析拟合误差,得出拟合准确度的结论。

### 2.1 误差估计的分析

误差估计就是研究计算结果的误差是否满足准确度要求,首先需要确定得到误差的方法,也就是计算误差的公式。由于采用加权最小二乘曲面法,常采用均方误差和最大误差的大小来判断拟合曲面的优劣<sup>[12]</sup>

$$\text{error}_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [\varphi(x_i, y_i) - \alpha_i]^2}{m}} \quad (13)$$

$$\text{error}_{\text{max}} = \max_{1 \leq i \leq m} |\varphi(x_i, y_i) - \alpha_i| \quad (14)$$

式中  $\alpha_i$  是精确值,  $\varphi(x_i, y_i)$  是使用加权小二乘曲面拟合的计算值。本文加权计算时,取加权因子为

$$W_i = 1/S_i^2 \quad (15)$$

式中  $S_i = \alpha - \alpha_c$ ,  $\alpha$  为计算所得恒星的实测赤经位置,  $\alpha_c$  为赤经的理论位置。(赤纬  $\delta$  类似)。

使用式(13)、式(14)的误差公式,参照式(8),多次计算,对曲面的拟合误差进行分析统计并得出误差估计的结论。

为分析方便,本文暂且不考虑星光亮度以及如何提取星象亮度中心的一些细节,但是提取一组精确的星像中心是高准确度天文定位的前提。

### 2.2 拟合准确度分析

2013年11月1日晚,天气晴好,在紫金山天文台进行了外场星图拍摄实验,机视场角为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 帧频 0.5 fps, 积分时间为 300~1 600 ms(可调),共得到 1 500 幅连续星图(相机指向  $[\alpha = 214.2369, \delta = 35.5556]$ )。使用 MaxIm plus4 天文软件打开相机拍

摄的原始星图,图 2 为其中一幅,图像大小为  $1\ 072 \times 1\ 027 \times 16$  bit。对拍摄的图像进行去背景、分割、剔除暗星等一系列的处理。

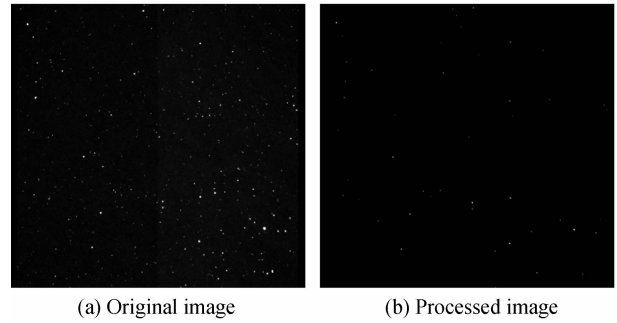


图 2 实际星图

Fig. 2 A night-sky image

鉴于地面观测实验都在夜间进行,其背景主要是由各类星体组成,观测点选址有效的避开了地面杂光干扰,观测期间背景的变化很小,可以认为背景图像灰度的空间分布是平稳的,灰度的统计均值和方差具有空移不变性。因此,观测空间目标的天文图像其背景是一个简单的星空背景。

在正式拍摄之前要进行标定,计算天顶的天球赤道坐标,具体可参考文献[7]。根据相机光轴的初始指向,确定相机指向的天区,进行局部天区星图识别,大大地减少了星图识别运算量,而且减小了天区大小的影响<sup>[13]</sup>。

图 3 显示的是赤经方向的标定误差与拟合次数之间的关系,一般随着拟合次数的增加,拟合误差逐渐变小,但是在三次拟合之后,拟合误差的变化幅度不很明显,而且拟合次数越大,占用的计算时间就越长,结合星图识别的具体情况(识别星数目可能小于 10),综合考虑,取三次曲面拟合进行拟合。

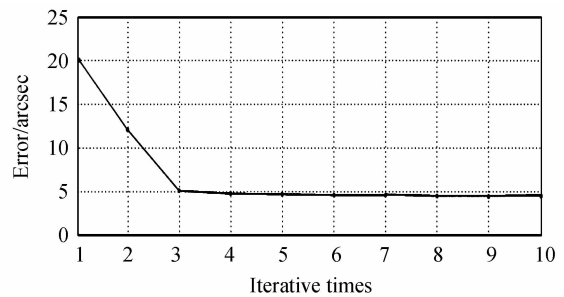


图 3 标定误差与拟合次数关系

Fig. 3 Relation between calibration error and iterative times

采用欧洲空间局发布的第谷 2 星表,共存储 2 539 913 颗恒星数据,最亮的恒星视星等  $\text{mag} = 1.905$ ,最暗的恒星视星等  $\text{mag} = 15.193$ 。对其中连续拍摄的 735 幅序列星图进行拟合计算。实际观测星在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上的误差(最大误差)分别为  $5.791''$  和  $3.891''$ ,均方误差均小于  $4''$ ,图 4 显示的是实际观测星分别在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上加权曲面误差。横轴表示最大偏

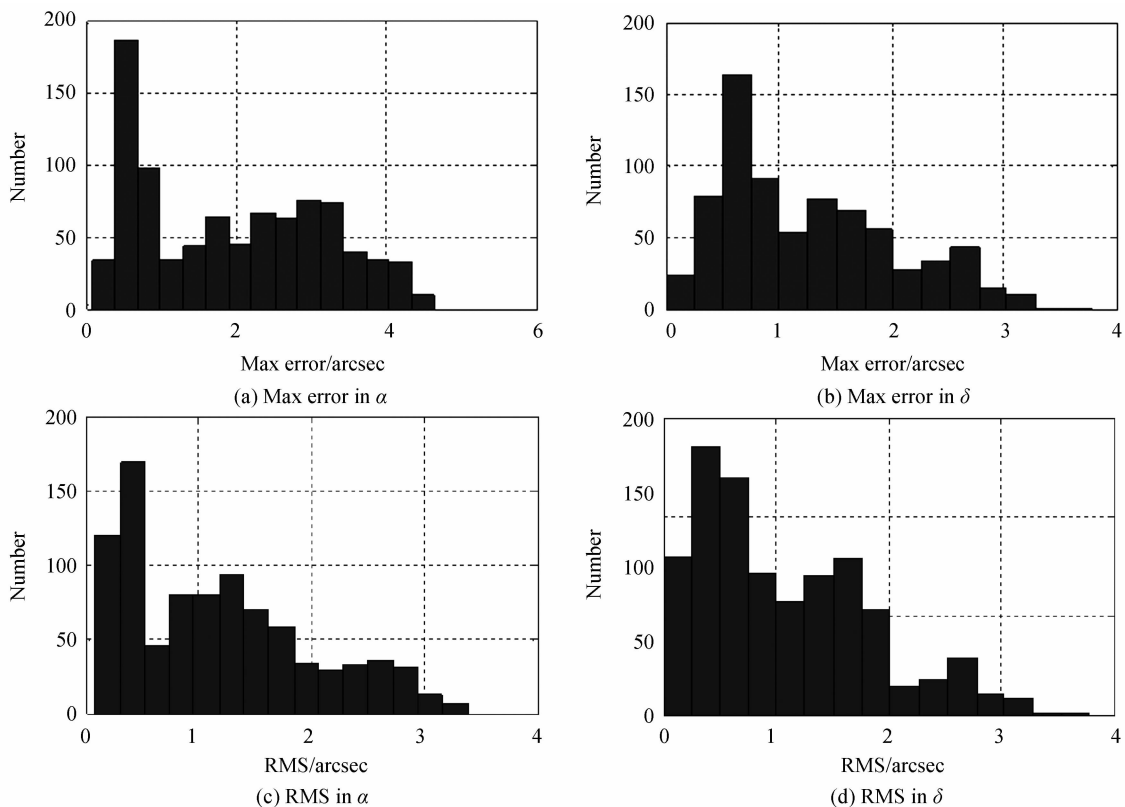


图 4 加权曲面误差  
Fig. 4 Weighted surface error

差或均方误差,纵轴表示此误差下星图的数目.

图5显示的是实际观测星分别在 $\alpha$ 与 $\delta$ 方向上

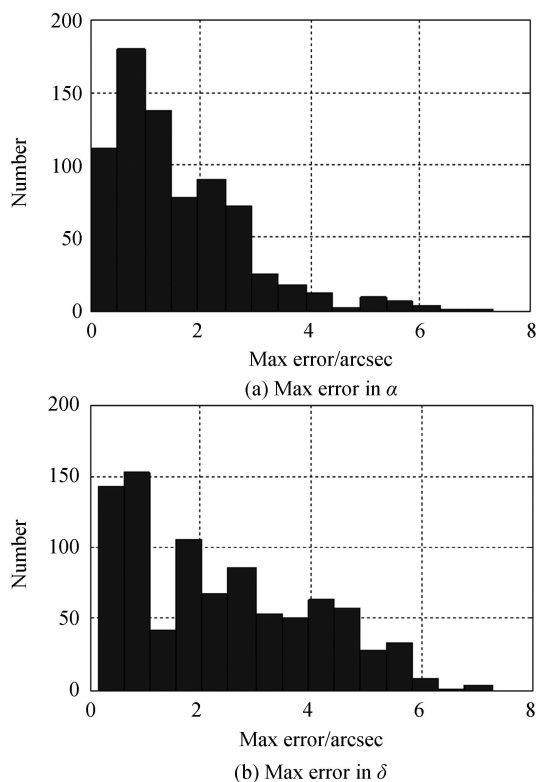


图 5 曲面误差  
Fig. 5 Surface error

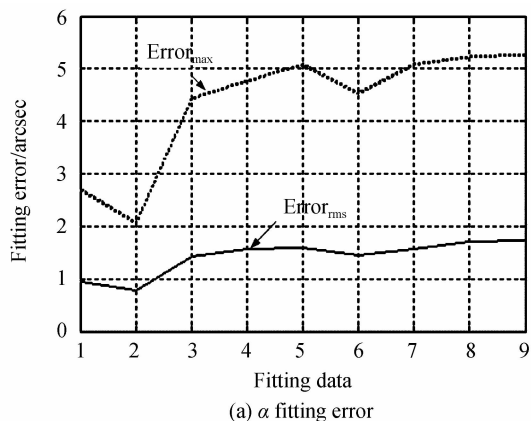
未加权的拟合曲面误差. 实际观测星在 $\alpha$ 与 $\delta$ 方向上的最大误差分别为 $7.682''$ 和 $7.593''$ .

对比图 4 和图 5 可知,加权曲面拟合的拟合准确度明显高于未加权的拟合准确度.

对其中识别出 18 颗星的 9 幅星图进行加权三次曲面拟合,误差如图 6 所示,左图为赤经的误差曲线,右图为赤纬的误差曲线.

表 1 为成功识别出 18 颗星的一幅星图的恒星识别对应表<sup>[13]</sup>. 图 7 为其赤经赤纬的拟合曲面图.

根据每幅星图星图识别出的结果,对所有星图的赤经和赤纬的拟合误差做了进一步的统计,如表 2.



(a)  $\alpha$  fitting error

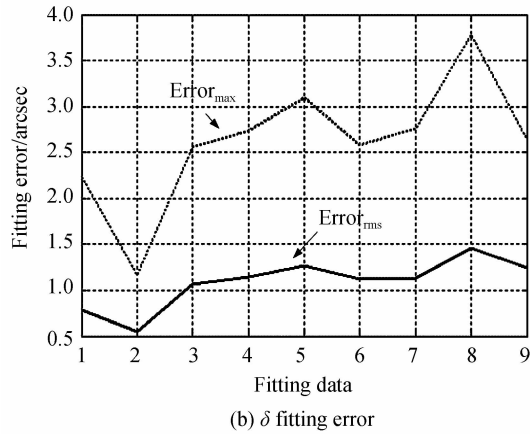


图6 拟合误差曲线  
Fig.6 Fitting error curve

表1 18颗星的坐标对应表

Table 1 18 stars coordinate correspondence table

Star number	Magnitude	CCD coordinates		Celestial coordinates	
		$x$	$y$	$\alpha$	$\beta$
1	4.859	438.85	840.79	196.01	51.562
2	6.268	976.06	391.81	198.73	51.364
3	6.27	284.57	102.87	197.71	53.077
4	7.527	988.07	283.65	199.07	51.515
5	7.839	712.54	572.11	197.51	51.536
6	7.984	977.01	544.97	198.29	51.108
7	8.35	668.97	814.61	196.71	51.206
8	8.448	909.48	699.22	197.67	50.975
9	8.692	203.08	427.85	196.53	52.677
10	8.861	952.87	489.87	198.38	51.242
11	8.95	156.29	128.91	197.28	53.261
12	9.256	823.06	630.1	197.64	51.243
13	9.426	279.03	467.36	196.63	52.477
14	9.703	689.24	565.39	197.47	51.588
15	9.769	119.7	395.82	196.39	52.877
16	9.806	537.08	436.17	196.57	51.793
17	9.917	876.34	326.75	197.98	51.982
18	9.982	264.29	694.28	197.26	51.361

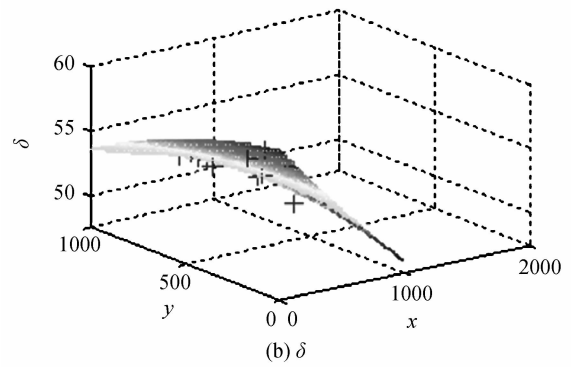
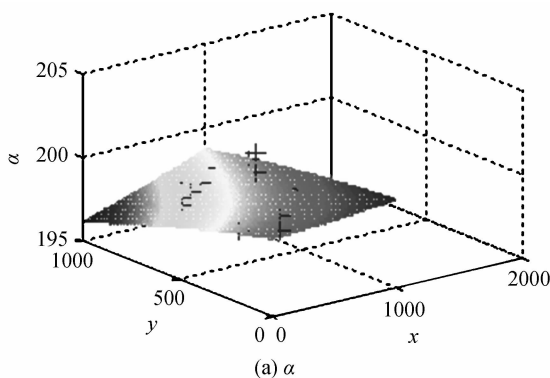


图7 18颗星的三次曲面拟合效果  
Fig.7 Three surface fitting results of 18 stars

表2 误差统计

Table 2 Error statistics

Fitting number	$\alpha$		$\delta$	
	RMS	Max error	RMS	Max error
18 stars	1.437"	5.273"	1.416"	3.734"
17 stars	1.652"	5.334"	1.452"	3.473"
16 stars	1.847"	5.375"	1.547"	3.775"
15 stars	1.673"	5.428"	1.673"	3.792"
14 stars	1.752"	5.783"	1.752"	3.783"
13 stars	1.858"	5.601"	1.758"	3.821"
12 stars	1.786"	5.558"	1.786"	3.848"
11 stars	1.976"	5.791"	1.846"	3.891"

从以上结果可见,三次曲面拟合随着参与计算星数目的增加,拟合误差也进一步的减小,则曲面拟合的准确度也就越高.拟合均方误差在赤经和赤纬均优于4",最大误差赤纬的拟合准确度水平高于赤经的拟合准确度水平,赤经的最大拟合误差小于6",赤纬的最大拟合误差小于4".计算结果比较理想.从计算结果来看主要存在两种误差,一种是固定误差,这是由于整个系统的设计制造以及光敏器件光电转换过程中有限的信噪比造成的.另一种是随机误差,它是由恒星分布、亮度引起的系统误差以及仪器设备和工作环境等因素产生的误差组成.相对而言,这些误差可以通过标定剔除,或是随机变化地可以通过数据处理方法予以抑制和平滑.由于CCD视场远远小于照相观测的视场,则不必考虑象差的影响,大气折射和广行差等误差影响可通过对度量坐标修正来减弱.

### 3 观测目标的拟合定位误差

#### 3.1 新方案的提出

针对假定的观测目标,根据CCD平面坐标求解其相应的天球坐标,进行误差分析.具体的步骤是:

- 1)对一幅星图,假设成功识别的恒星数目为  $n$  颗,

任意挑选出 1 颗恒星作为观测目标,其 CCD 平面坐标为  $(x, y)$ , 天球坐标为  $(\alpha, \delta)$ ;

2) 用剩下  $(n-1) \dots \dots 11$  颗星分别进行三次曲面拟合;

3) 得到一组三次曲面方程, 代入观测目标的 CCD 平面坐标分别求解其相应的天文坐标;

4) 利用公式:  $|\text{error}_\alpha| = |\alpha - \alpha_i|$ 、 $|\text{error}_\delta| = |\delta - \delta_i|$  计算赤经  $(\alpha)$ 、赤纬  $(\delta)$  的三次曲面定位偏差;

5) 用得到的观测目标的偏差绘制定位偏差曲线.

### 3.2 观测分析

使用分析拟合误差的原始数据, 用 312 幅成功识别的星图结果, 根据上述步骤进行观测目标定位偏差分析. 由于每组星图的实验结果大致一样, 图 8 为其中一幅星图定位误差的情况.

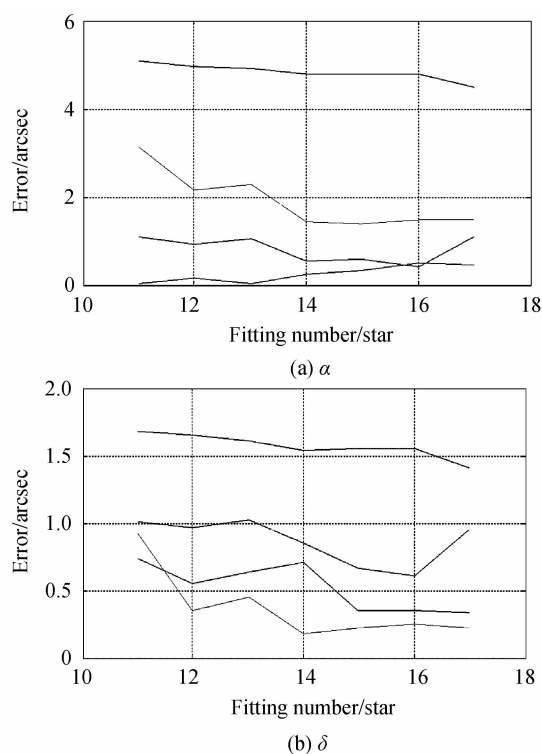


图 8 观测目标的定位准确度  
Fig. 8 Positioning accuracy of the observed object

图中横轴表示参与曲面拟合的离散点个数(成功识别恒星数目), 纵坐标为计算的目标星的偏差, 4 条曲线依次为任选不同的 4 颗恒星作为目标的定位偏差曲线. 图 9 为识别出 17 颗星的一幅星图.

选择其中的第 3 颗星作为观测目标, 依次选取剩下的 16、15...、11 颗星进行三次曲面拟合, 使用得到的三次曲面方程, 代入第 3 颗星的 CCD 平面坐标, 求解其相应的天文坐标, 求出定位偏差曲线如图 10 所示, 左图为赤经的定位偏差右图为赤纬的定位偏差.

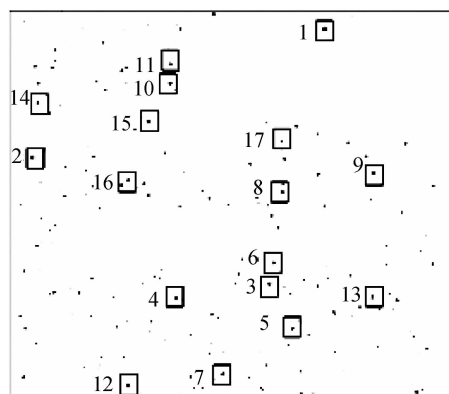


图 9 识别 17 颗星的星图  
Fig. 9 The star map identified 17 stars

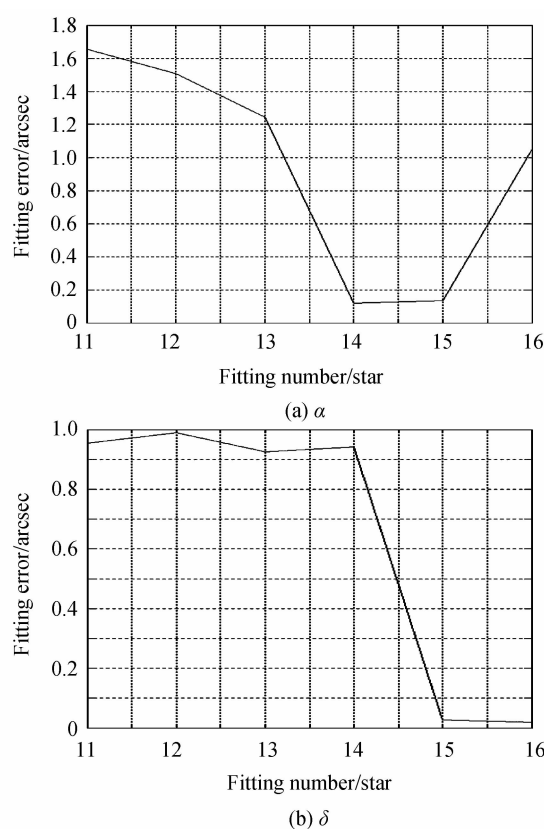


图 10 观测目标星 3 的定位偏差  
Fig. 10 Positioning declination of the observation star 3

若选择处于边缘的第 2 颗星作为观测目标, 依次选取剩下的 16、15...、11 颗星进行三次曲面拟合, 求出定位偏差曲线如图 11 所示.

从图 10、图 11 可知, 定位准确度与空间目标在 CCD 面上的像点位置有关, 该准确度随着像点离 CCD 中心距离的增大有所下降. 选择位于边缘的第 2 颗星作为观测目标的定位误差比选择第 3 颗星作为观测目标的定位误差大  $3''$ , 所以将空间目标成像在像面中心位置附近时, 视位置准确度较高.

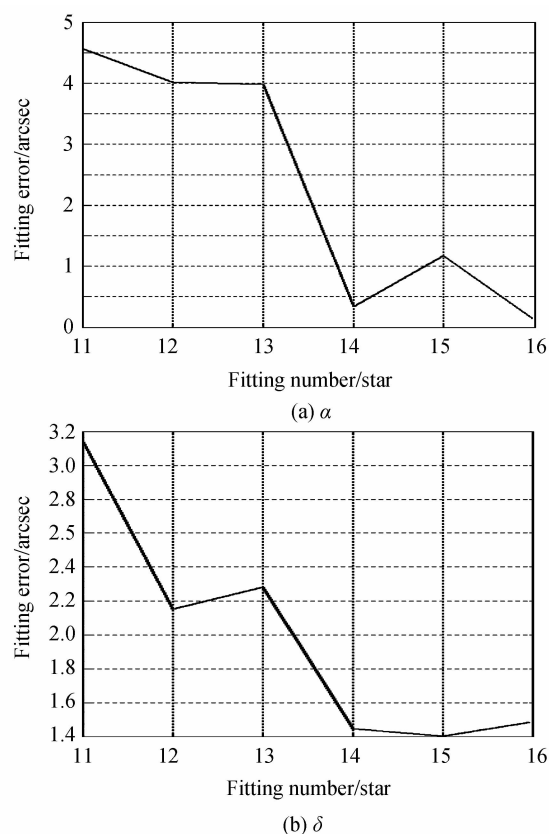


图 11 观测目标星 2 的定位偏差

Fig. 11 Positioning declination of the observation star 2

从以上图示以及大量的观测计算可知,对于观测目标的天文定位,根据其 CCD 本体坐标求解其相应的天球坐标,得到了赤经最大定位误差为  $5.13''$ ,赤纬最大定位误差为  $1.74''$ ,结果比较理想.从图 8 可见定位准确度随参与星的数目的增大而降低,当 17 颗星参与拟合计算时,赤经的定位误差最大为  $4.12''$ ,赤纬的定位误差最大为  $1.43''$ .当 11 颗星参与拟合计算时,赤经的定位误差最大为  $5.13''$ ,赤纬的定位误差最大为  $1.74''$ .赤纬的定位准确度高于赤经的定位准确度,可见对于高准确度、大数据量的天文定位,该方法完全能够满足天文观测相机天文定位的准确度要求.

由于该方法降低了恒星位置误差对观测结果的影响,而且曲面拟合能够剔除定标星的偶然匹配误差,从而提高了观测数据的利用率以及天文定位准确度.为进一步的数据处理提供了基础.

## 4 结论

天文定位是利用 CCD 天文观测相机在凝视成像模式下拍摄系列星图,进行星点提取和星图匹配,计算得到 CCD 本体坐标系到天球坐标系的位置转换矩阵,再结合目标在相机 CCD 面上的坐标位置,便可获取目标相对恒星的位置信息.本文提出了一种基于矢量分析的,同时可处理多星观测信息的天文定位方法.该方法可以用来修正 CCD 的空间量化误差和镜头的畸变

对测量误差的影响.通过实际星空观测,对连续拍摄的星图进行分析计算,结果表明,拟合均方误差在赤经和赤纬均优于  $4''$ .赤纬的定位准确度高于赤经的定位准确度,赤经的最大定位误差为  $5.13''$ ,赤纬的最大定位误差为  $1.74''$ .该方法降低了恒星位置误差对结果的影响,剔除了定标星的偶然匹配误差,提高了观测数据的利用率以及天文定位准确度.在实际工作中有较高的应用价值.

## 参考文献

- [1] SAMAAN M A. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification [D]. America: TEXAS A&M University, 2003, 25-33.
- [2] GYULA S, RIK P. An efficient nonlinear least square multisine fitting algorithm[C]. IEEE, 2002: 750-755.
- [3] YU Jian-hui, SU Zeng-li, TAN Qian. Analysis on the space-based optic observation mode for space object[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(6): 772-776. 余建慧,苏增立,谭谦.空间目标天基光学观测模式分析[J].量子电子学报,2006,**23**(6):772-776.
- [4] BRAUN C V, SHARMA J, GAPOSCHKIN E M, et al. Space-based visible metric accuracy[J]. *Journal Of Guidance Control And Dynamics*, 2000, **23**(1): 175-181.
- [5] LU Chun-lin, ZHANG Xiao-xiang, GU Guang-de. Realtime celestial positioning method of space object [P]. Chinese Patent; CN1710377, 2005-12-21. 鲁春林,张晓祥,顾光德.空间目标实时天文定位方法[P].中国专利;CN1710377,2005-12-21.
- [6] LIEBE C C, DENNISON E W. Active Pixel Sensor (APS) based star sensor[C]. IEEE, 1998: 119-127.
- [7] LI Chun-yan, LI Huai-feng, SUN Cai-hong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 558-563. 李春艳,李怀锋,孙才红.高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J].光学精密工程,2006, **14**(4):558-563.
- [8] ZHANG Hui, TIAN Hong, LIN Ling. Error analysis of spaced-based celestial positioning for space object[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(5): 1345-1351. 张辉,田宏,林玲.空间目标天基天文定位误差分析[J].宇航学报,2010,**31**(5):1345-1351.
- [9] ZHANG Xi, HU Chun-hua, CHEN Wu-yi. Quadratic surface fitting and uncertainty analysis of firing parameters [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(9): 1091-1095. 张曦,胡春华,陈五一.二次曲面拟合与拟合参量不确定度分析[J].北京航空航天大学学报,2006,**32**(9): 1091-1095.
- [10] RUFINO G, ACCARDO D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, **53**(2): 135-147.
- [11] LIU Xie-jin, YANG Ge-lan, HUO Yu-hong. Research of recursive weighted least squares algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(14): 4248-4250. 刘谢进,杨格兰,霍玉洪.递推加权最小二乘算法的研究[J].系统仿真学报,2009,**21**(14):4248-4250.
- [12] 毛英泰.误差理论与准确度分析[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [13] RAN Xiao-qiang, WEN De-sheng, QIU Yue-hong. A novel multi-triangle star pattern recognition algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1867-1871.

- 冉晓强,汶德胜,邱跃洪. 一种新的多三角形星图识别算法[J]. 光子学报, 2009, **38**(7):1867-1871.
- [14] JIN Guang, WANG Jia-qi, NI Wei. Calibration of pointing accuracy with electro-optic phototheodolites by the star arc-length[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(4): 91-95.
- 金光,王家琪,倪伟. 星体弧长法标定光电经纬仪指向准确度[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(4):91-95.
- [15] LI Chong-hui, LI Zhu-yang, ZHENG Yong. Celestial positioning analysis based on multi-star vector observation information[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, **1**(3): 62-65.
- 李崇辉,李铸洋,郑勇. 利用多星矢量观测信息进行天文导航定位技术的研究[J]. 导航定位学报, 2013, **1**(3):62-65.
- [16] JIN Guang, WANG Jia-qi, NI Wei. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 89-94.
- 金光,王家琪,倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(5):89-94.
- [17] 苏宜. 天文学新概论[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2005.