

面向空间碎片观测的望远镜指向误差校正方法*

孙荣煜^{1,2†} 鹿 瑶^{1,2,3} 赵长印^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 空间碎片光学观测图像的处理过程中, 受望远镜指向误差影响, 背景恒星易出现错误匹配或无法匹配的情况, 给底片模型的计算与目标的精密定位带来困难. 从空间碎片观测图像的特点出发, 提出了一种基于特征恒星的多邻域迭代匹配法. 实测数据的试验结果表明, 该方法消除了望远镜跟踪误差带来的影响, 大幅提高了背景星图匹配的效率和正确率, 且时间开销较少, 有利于数据的实时处理.

关键词 天体测量, 技术: 图像处理, 望远镜, 方法: 统计

中图分类号: P123; **文献标识码:** A

1 引言

使用地基光学望远镜观测空间碎片, 目标的赤道坐标一般由天文定位给出. 天文定位是一种相对定位方法, 其实质为利用实测图像中目标星像与背景恒星的相对位置关系, 由恒星的位置计算得到目标的位置^[1]. 具体计算时, 首先提取星表中的恒星位置, 经过历元、站心等一系列坐标转换, 并借助定义在切平面上的中间坐标系, 得到观测时刻恒星在图像中的理想坐标, 随后将其与恒星的量度坐标配准, 最终得到赤道坐标与图像量度坐标间的映射关系, 并通过该关系计算目标的位置^[2]. 出于空间碎片的观测需要, 专用于观测空间碎片的地基光学望远镜往往需要很大的视场, 因此图像中背景恒星的数目较多, 通常为几百颗至上千颗不等, 当望远镜指向精确时, 出于实时性考虑, 在恒星理想坐标的邻域匹配量度坐标, 即可完成星像配准.

观测空间碎片时, 由于碎片与背景恒星存在相对运动, 为了保证目标星像的信噪比, 最大化设备的探测能力, 望远镜跟随目标运动, 因此观测图像中碎片星像呈点状, 恒星星像拉长^[3]. 考虑到空间碎片运动角速度较快, 快速跟踪过程中, 望远镜的机械不稳定性使得设备指向易出现动态偏差, 加上望远镜制造、加工、装配过程中引入的静态指向误

2014-09-24收到原稿, 2014-10-22收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11403108, 11125315)资助

†rysun@pmo.ac.cn

差^[4],影响了背景恒星邻域匹配的正确率,降低了底片模型与空间碎片位置的计算精度,严重时甚至出现匹配恒星数目不足,无法计算底片模型的情况,因此,如何在望远镜指向误差较显著时,完成空间碎片观测图像中恒星理论位置与实测位置的高精度匹配,从而解算出真实的底片模型,是需要数据处理中予以考虑的问题。

空间碎片观测图像中恒星实测位置与理论位置的匹配,其本质上是一个密集星场中的星图配准问题.星图匹配是从模式数据库中寻找与观测星图中的模式构成最优匹配的过程,其方法在天文观测与空间导航领域已研究多年.目前成熟的星图匹配算法大致有两类:一类以星对角距为基础,构造简单的几何构形作为匹配模式并进行匹配,相应的代表性方法有三角形算法^[5-6]、金字塔算法^[7]以及基于经典三角形算法的改进方法^[8]等,该类方法思路直观,易于实现;另一类方法以选定的主星为匹配元,将主星周围伴星的分布特征作为匹配模式,选取相似度最高者作为匹配结果,代表算法有栅格算法^[9]、径向环向分布特征识别算法^[10]等.除此之外,遗传算法^[11]、神经网络算法^[12-13]也在星图匹配工作中有着相应的拓展应用.本文从空间碎片观测图像的特点出发,提出了一种多邻域迭代匹配的星像配准方法,该方法能在望远镜指向误差较大、星像成像质量较差的情况下,高准确率地完成星像的匹配工作。

本文首先简要介绍了空间碎片观测图像的特点,以及星图匹配过程中遇到的问题,随后阐述了本文所提出星像配准算法的计算流程,并使用该方法处理了多帧实际观测图像,得到单帧图像中恒星匹配的数目、恒星位置测量误差的统计结果、单帧图像处理时间,最后比较了本文方法与原方法的计算结果,验证本文方法的改进。

2 基本原理与方法

2.1 空间碎片观测图像特点

传统观测模式下,根据碎片位置的先验信息^[14-15],将望远镜指向预报天区,待碎片进入视场后,启动闭环跟踪,望远镜跟随目标曝光.相应地,空间碎片的观测图像有以下特点:

(1)为了保证目标的观测效率,望远镜具有较大的视场,因此图像中存在相当数量的背景恒星,给降低星像匹配方法的时间开销、提高观测数据处理的实时性带来难度.同时,过大的视场使得星像欠采样较严重^[16],降低了星像量度坐标的精度,易增加错误匹配的数量,降低匹配算法的效率。

(2)由于观测的目标与背景恒星间存在相对运动,望远镜跟踪观测目标,使得背景恒星星像拉长.过长的曝光时间易使得恒星星像拉长严重,影响目标检测与星像信息提取,因此实际观测时单帧图像曝光时间受到限制,通常不大于5 s,使得图像噪声水平较高,星像信噪比较低.这些因素影响了恒星星像的成像,增加了恒星的位置测量误差,在星像匹配时需予以考虑。

(3)由于空间碎片观测需要高帧频,相机前端往往拆除机械快门,使得图像中的亮星产生拖尾^[17-18],拖尾降低了图像中亮星位置的测量精度,同时增加了附近星像的检测难度,影响了星图匹配的效率.与此同时,望远镜光学系统的畸变也影响了星像的成像,增加了视场边缘恒星的理论位置与实测位置间的偏差,增加该区域星像匹配的难度。

考虑到空间碎片观测望远镜的机架类型主要为地平式、水平式,实测图像中的量度

坐标系与理想坐标系间存在旋转. 因此, 望远镜的指向误差使得观测图像中的量度坐标系与理想坐标系间存在原点差与坐标轴的方向差, 这两种误差的影响体现在理论星图与实测星图配准关系的线性项中, 而望远镜光轴与底片不垂直、光学畸变等因素的影响, 则体现在星图配准关系的非线性项中. 本文方法的基本思路为: 基于邻域匹配的思想, 先使用较大的邻域搜索图像中的特征恒星, 并进行匹配, 随后基于这些恒星, 逐次修正上述因素的影响, 并以缩小的邻域范围匹配恒星, 以获得最终结果.

2.2 星图匹配算法

基于空间碎片观测图像的特点, 设计星图匹配方法的流程如下:

(1) 首先, 根据观测图像的曝光时间, 将星表中恒星的位置由历元平位置转换至观测时刻的瞬时视位置, 然后根据望远镜的指向信息与视场参数, 从星表中快速检索在望远镜视场内的恒星, 记其集合为 C , 计算这些恒星在切平面中间坐标系中的坐标 (ξ, ζ) , 最终得到背景恒星在图像中的理想坐标 (X_1, Y_1) . 由于望远镜指向误差一般在角分的量级, 远小于望远镜视场的大小, 因此使用带误差的指向信息提取星表, 对结果影响不大. 与此同时, 对观测图像全帧扫描, 获得图像中星像的量度坐标 (x, y) 以及相应的灰度、像元数目等信息, 扫描得到的星像集合记为 O .

(2) 将检索到的恒星集 C 按星等从小到大排序, 将扫描得到的星像集 O 按灰度值从大到小排序. 首次匹配选取 O 与 C 中前 N_1 颗星, 以理想坐标 (X_1, Y_1) 为中心, 搜索附近 $B_1 \times B_1$ 像素的矩形区域, 若该区域内存在唯一的扫描所得星像, 则认为该星像量度坐标 (x, y) 与理想坐标 (X_1, Y_1) 匹配成功. 即在首次匹配过程中, 认为图像中亮度较高、周围较大邻域范围内存在唯一匹配星像的恒星为特征恒星, 并将这些恒星找出. 对多组匹配成功的星像做如下拟合:

$$\begin{aligned} x &= a_1 + a_2 X_1 + a_3 Y_1, \\ y &= b_1 + b_2 X_1 + b_3 Y_1, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)$ 为拟合系数, 通过拟合, 可消除由于指向误差引起的坐标间的线性偏差. 需要说明的是, 为了寻找匹配的恒星对, 首次匹配所选取的搜索阈值 B_1 较大, 可根据指向误差的先验信息估计得到. 由于图像中亮星受多种成像因素影响, 质心测量精度不高, 且首次匹配的特征恒星可能在视场中分布不均匀, 因此将本步结果作为初值, 逐次精密匹配恒星坐标. 根据拟合所得系数, 对恒星集 C 中所有恒星的理想坐标进行改正, 改正后值为 (X_2, Y_2) .

$$\begin{aligned} X_2 &= a_1 + a_2 X_1 + a_3 Y_1, \\ Y_2 &= b_1 + b_2 X_1 + b_3 Y_1. \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 针对 C 中所有恒星, 在每颗恒星理想坐标 (X_2, Y_2) 附近 $B_2 \times B_2$ 像素区域内搜索, 本次匹配所用阈值 $B_2 < B_1$. 若恒星理想坐标邻域内存在唯一的扫描星像, 则判断匹配成功, 再次计算坐标修正系数:

$$\begin{aligned} x &= a_1 + a_2 X_2 + a_3 Y_2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_2 Y_2 + a_6 Y_2^2 + a_7 X_2^3 + a_8 X_2^2 Y_2 + a_9 X_2 Y_2^2 + a_{10} Y_2^3, \\ y &= b_1 + b_2 X_2 + b_3 Y_2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_2 Y_2 + b_6 Y_2^2 + b_7 X_2^3 + b_8 X_2^2 Y_2 + b_9 X_2 Y_2^2 + b_{10} Y_2^3, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $(a_1, a_2, \dots, a_{10})$ 与 $(b_1, b_2, \dots, b_{10})$ 为拟合系数. 本次修正考虑了匹配模型中的非线性高阶项, 可以提高视场边缘区域恒星的匹配效率. 对匹配成功的恒星, 再次修正其理想坐标为 (X_3, Y_3) .

$$\begin{aligned} X_3 &= a_1 + a_2 X_2 + a_3 Y_2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_2 Y_2 + a_6 Y_2^2 + a_7 X_2^3 + a_8 X_2^2 Y_2 + a_9 X_2 Y_2^2 + a_{10} Y_2^3, \\ Y_3 &= b_1 + b_2 X_2 + b_3 Y_2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_2 Y_2 + b_6 Y_2^2 + b_7 X_2^3 + b_8 X_2^2 Y_2 + b_9 X_2 Y_2^2 + b_{10} Y_2^3. \end{aligned} \quad (4)$$

(4)对于所有恒星, 以每颗恒星的 (X_3, Y_3) 为中心, 搜索其 $B_3 \times B_3$ 像素大小的邻域, 所用阈值 $B_3 < B_2 < B_1$, 得到的唯一匹配对即为最终结果. 针对所有匹配成功的恒星, 使用量度坐标 (x, y) 与匹配恒星的坐标 (ξ, ζ) , 即可计算底片模型, 得到精密的天文定位结果.

3 试验方法

为了验证本文算法的有效性, 使用专用于观测空间碎片的光学望远镜, 随机采集多帧试验图像. 试验所用图像的相关参数如表1所示.

表 1 图像相关参数
Table 1 Information of images

Parameter	Value
Size	2048 × 2048
Field of view	4.4° × 4.4°
Spatial sampling	7.73''
Exposure time	2000 ms
Number of frames	364
CCD operating mode	Full frame
Number of channels	4

图像采集完成后, 考虑望远镜的探测能力与曝光时间, 提取Tycho-2星表中亮于 12 等的恒星, 将其历元平位置计算至观测时刻的瞬时视位置, 得到望远镜视场中背景恒星的理想坐标. 随后使用SExtractor软件^[19]得到 CCD 图像中星像的量度坐标, 使用原方法与本文改进的方法将这两种坐标进行匹配, 匹配时选取的参数依次为 $B_1 = 30$, $B_2 = 15$, $B_3 = 5$, $N_1 = 100$. 针对匹配上的坐标, 通过二十常数底片模型对图像进行天文定位, 得到恒星的实测赤道坐标 (α_o, δ_o) , 与星表中的参考值 (α_c, δ_c) 进行比较, 得到相应的测量误差 $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta)$:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha &= (\alpha_o - \alpha_c) \times \cos \delta_c, \\ \sigma_\delta &= \delta_o - \delta_c. \end{cases} \quad (5)$$

对于单帧图像中的所有恒星, 统计其赤经与赤纬测量误差的RMS (Root Mean Square, 均方根), 作为该图像赤经、赤纬的计算精度, 同时衡量图像恒星匹配方法的正

确率. 对于单帧图像中的 N 颗背景恒星, 计算过程如下:

$$\begin{cases} \text{RMS}_\alpha &= \sqrt{\frac{\sum(\alpha_o - \alpha_c)^2 \times \cos^2 \delta_c}{N-1}}, \\ \text{RMS}_\delta &= \sqrt{\frac{\sum(\delta_o - \delta_c)^2}{N-1}}. \end{cases} \quad (6)$$

4 试验结果与讨论

挑选某帧试验图像的左上区域如图1所示, 为了显示方便, 图像经反白处理, 图中的矩形为星表中恒星理论位置的示意, 矩形框大小为 10×10 pixel. 从图中不难发现, 望远镜指向误差较显著, 恒星理论位置与实测位置间有较大偏差, 使用邻域匹配法, 难以进行高准确率的匹配, 经一次计算后, 靠近图像视场中央的部分恒星已完成匹配(参见图像中的右下区域), 而处于图像边缘的恒星, 其理论位置与实测位置间仍有较大的偏差, 经过最终的迭代计算后, 恒星理论位置与实测位置匹配成功. 匹配过程的另一示例见图2.

使用本文算法逐次计算时每帧图像匹配的恒星数目如图3所示. 首次匹配成功的特征恒星数量较少, 在 50 颗左右, 虽然可以满足高阶模型的参数计算要求, 然而由于首次匹配所挑选恒星的亮度较高, 受拖尾等因素影响, 这些恒星质心计算误差大, 影响高阶模型的计算精度. 同时这些亮星在视场中一般不满足均匀分布的要求, 如不采用逐次匹配的方法, 实际工作中易使得特征星较稀疏的区域中, 匹配失败或匹配错误的情况增多, 影响全图恒星匹配的效率. 因此处理时使用从低阶到高阶模型, 匹配阈值逐次减小的修正方法, 可以降低亮星质心计算误差与分布不均匀带来的影响, 取得良好的星图匹配效果.

将本文多邻域匹配算法与传统邻域匹配法的结果进行比较, 后者在具体处理时, 直接在恒星理论位置坐标的 10×10 pixel 邻域内匹配实测坐标, 并计算底片常数, 得到恒星赤道坐标的测量误差. 两种方法匹配成功的恒星数目、匹配成功星像数目与SExtractor提取星像数目的比值如图4所示.

从图中不难发现, 本文方法对恒星的匹配效率较高, SExtractor提取的星像全部与星表中的恒星对应成功, 使用原匹配方法, 恒星的匹配数量与匹配效率都大大降低. 两种方法匹配所得恒星的位置测量误差统计值如图5所示. 使用原方法, 恒星的测量精度较差, 单帧图像中星像赤经、赤纬测量误差的 RMS 可高达 $20''$, 不难推断受望远镜指向误差影响, 出现较多恒星匹配错误的情况, 影响了底片常数的计算精度. 对于改进后方法匹配所得的恒星, 其赤经与赤纬测量精度在 $0.7''$ 附近, 考虑设备的像元分辨率为 $7.73''$, 测量精度约为 0.1 pixel, 与理论精度相一致, 可认为改进后的方法大幅提高了恒星匹配的正确率与效率.

使用本文方法匹配观测图像中的恒星, 匹配方法所消耗的时间如图6所示. 数据处理所用机器为普通商用PC机, 对于绝大多数图像, 匹配 500 颗恒星的时间不多于 30 ms, 匹配方法的时间开销小, 效率高, 可以满足空间碎片观测数据处理的实时性需求.

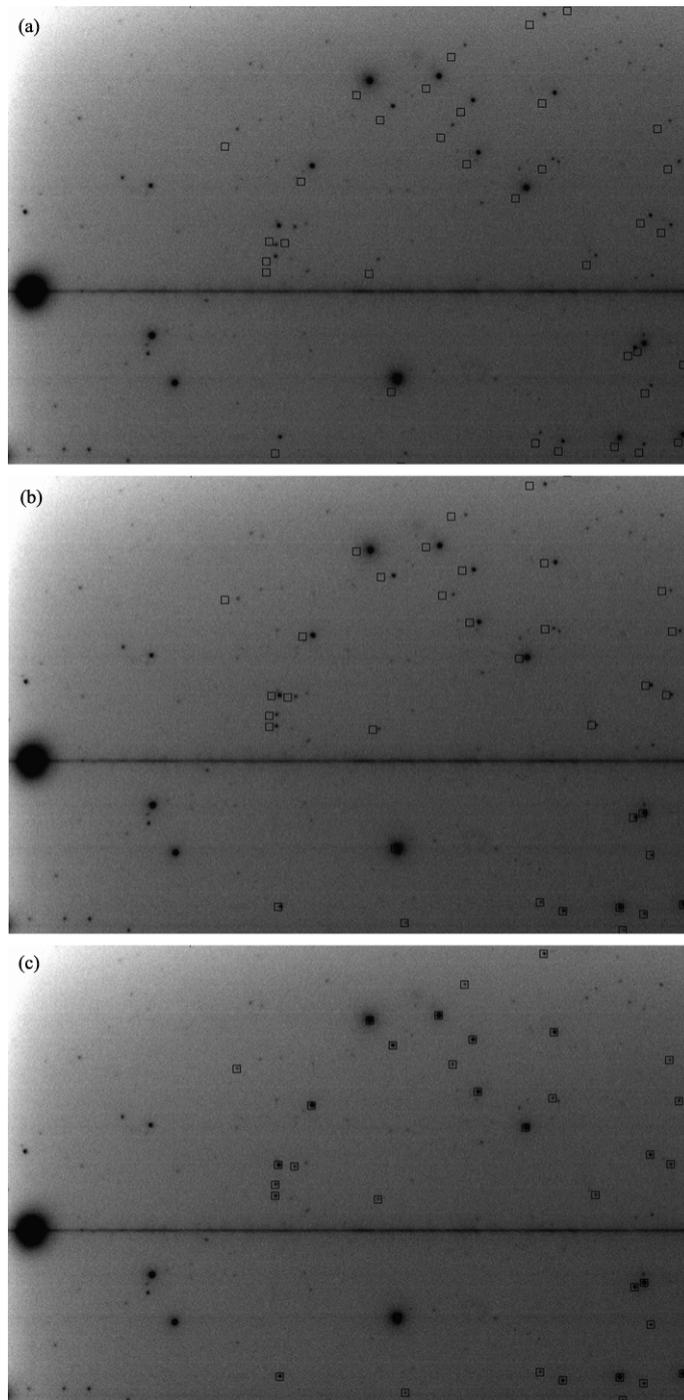


图 1 恒星匹配过程示例 1. (a) 原始匹配结果. (b) 一次校正后的结果. (c) 最终匹配结果

Fig. 1 Example 1 of the star matching process. (a) Original result. (b) The result after 1st correction. (c) Final result

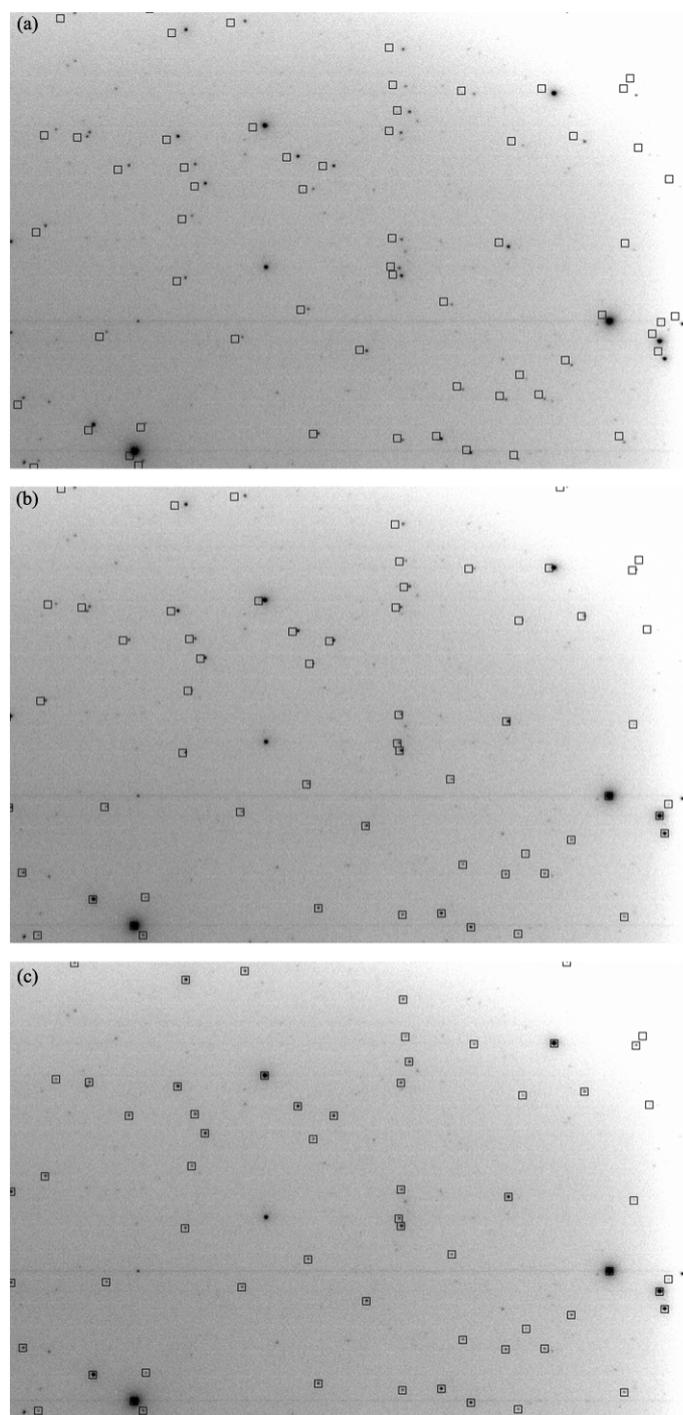


图 2 恒星匹配过程示例 2. (a) 原始匹配结果. (b) 一次校正后的结果. (c) 最终匹配结果

Fig. 2 Example 2 of the star matching process. (a) Original result. (b) The result after 1st correction. (c) Final result

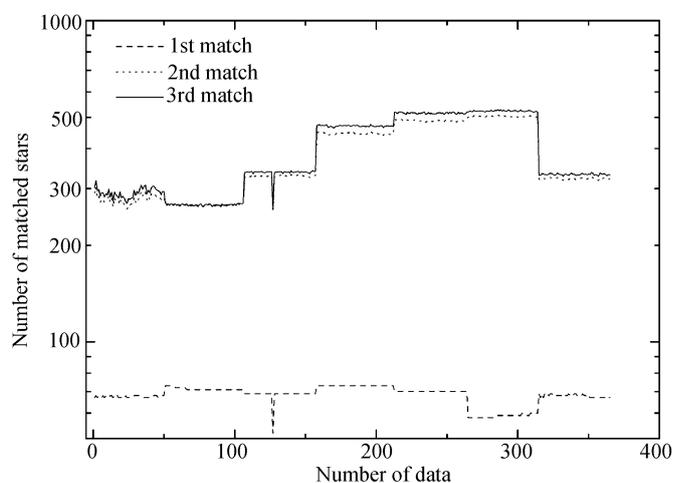


图 3 多次匹配的恒星数量

Fig. 3 The star number for multiple matching

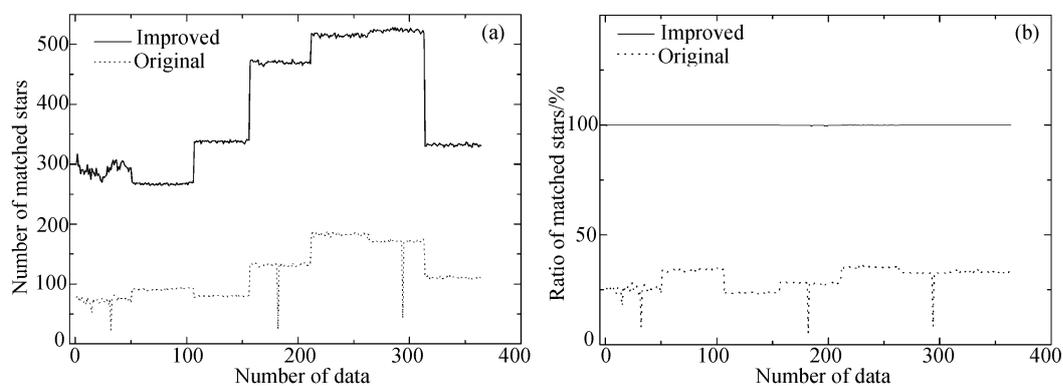


图 4 改进方法与原方法计算结果的比较. (a) 恒星匹配数量. (b) 匹配成功星像占图像扫描星像的比值

Fig. 4 The comparison of the results with original and improved methods. (a) Number of matched stars. (b) Ratio of matched stars to extracted ones

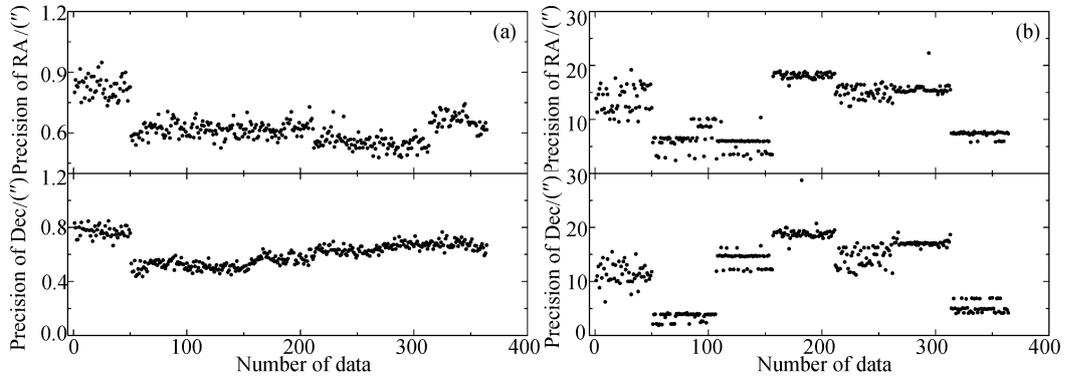


图 5 匹配恒星的赤道位置计算精度. (a) 本文改进方法. (b) 原始方法

Fig. 5 The precision of equatorial coordinates for matched stars. (a) Improved method. (b) Original method

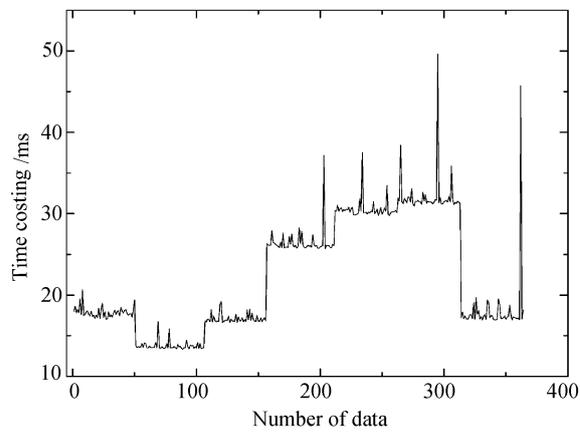


图 6 匹配方法消耗的时间

Fig. 6 The time costing for the matching process

5 结论

空间碎片观测数据处理时, 通常使用邻域匹配的方法关联背景恒星的理想坐标与量度坐标, 进而计算底片模型, 得到目标的实测位置. 实际工作中, 受望远镜指向误差影响, 背景恒星的理想坐标与量度坐标间易存在较大偏差, 减少了恒星的匹配数量, 降低了邻域匹配的正确率, 最终影响了星像位置的计算精度. 本文提出了一种多邻域迭代匹配的背景星图匹配方法, 通过寻找图像中满足要求的特征星, 逐次修正望远镜指向误差带来的星图偏移, 最终高准确率、高效地完成实测图像中的背景恒星匹配. 基于实测图像的试验结果表明, 使用本文方法, 在望远镜指向误差较显著时, 大幅提高了恒星匹配的数量与正确率, 降低了星图匹配错误带来的影响, 提高了底片模型的计算精度, 且本文算法简便易行, 时间开销少, 可以满足数据处理实时性的需求.

参 考 文 献

- [1] 孙荣煜, 赵长印. 天文学进展, 2012, 30: 394
- [2] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. 天体测量方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 70-91
- [3] Schildknecht T. A&ARv, 2007, 14: 41
- [4] 平一鼎, 张晓祥, 鲁春林. 天文学报, 2006, 47: 224
- [5] Cole C L, Crassidis J L. JGCD, 2006, 29: 64
- [6] Padgett C, Delgado K K, Udomkesmalee S. JGCD, 1997, 20: 259
- [7] Mortari D, Samaan M A, Bruccoleri C, et al. Navig, 2004, 51: 171
- [8] Mortari D, Neta B. k-vector Range Searching Techniques. 10th Annual AIAA/AAS Space Flight Mechanics Meeting. Clearwater. 2000 January 23-26
- [9] Padgett C, Delgado K K. IAESM, 33: 202
- [10] Zhang G J, Wei X G, Jiang J. Image and Vision Computing, 2008, 26: 891
- [11] Paladugu L, Williams B G, Schoen P M. Star Pattern Recognition for Attitude Determination using Genetic Algorithms. 17th AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, 2003 August 11-14
- [12] Lindsey C S, Lindblad T, Eide A J, Rogers S K, ed. Proceedings of the SPIE, Applications and Science of Artificial Neural Networks III, 1997, 3077: 471
- [13] Kim K T, Bang H. JAnSc, 2004, 52: 239
- [14] 孙荣煜, 张晓祥, 赵长印. 天文学报, 2013, 54: 169
- [15] Sun R Y, Zhang X X, Zhao C Y. ChA&A, 2013, 37: 464
- [16] Lauer T R. PASP, 1999, 111: 227
- [17] 孙荣煜, 赵长印, 平一鼎, 等. 天文学报, 2012, 53: 80
- [18] Sun R Y, Zhao C Y, Ping Y D, et al. ChA&A, 2012, 36: 340
- [19] Bertin E, Arnouts S. A&AS, 1996, 117: 393

A Method for Correcting Telescope Pointing Error in Optical Space Debris Surveys

SUN Rong-yu^{1,2} LU Yao^{1,2,3} ZHAO Chang-yin^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT During the data reduction process of optical space debris surveys, the background stars may be mismatched or not able to get matched due to the influences of telescope pointing error, then it is difficult to obtain the precise plate constant and object positions. Based on the special characteristics of debris CCD images, a method utilizing the featured stars with multiple neighbourhood matching is developed. The experimental results show that the influences of telescope pointing error are removed, the efficiency and accuracy of matching are improved distinctly. Meanwhile the time costing of our method is low, so it is beneficial to real-time data reduction.

Key words astrometry, techniques: image processing, telescopes, methods: statistical