激光写光电子学进展

# 自适应指向误差的快速星图识别方法

王华超<sup>1,2\*</sup>, 刘静<sup>1,2</sup>, 程昊文<sup>1,2</sup>, 彭喜衍<sup>1</sup> <sup>1</sup>中国科学院国家天文台, 北京 100101;

<sup>2</sup>中国科学院大学天文与空间科学学院,北京 100049

**摘要** 新疆25 cm 望远镜是一台小口径巡天望远镜,用于支撑地球同步轨道(GEO)监测任务。空间物体监测需要依靠 快速的光学图像处理技术,采用天文定位方法得到空间物体的赤经-赤纬测量信息。新疆25 cm 望远镜具有指向误差较 大的问题,严重影响光学图像处理的成功率。本研究分析指向误差对天文定位中星图识别的影响,提出一种改进的以指 向搜索为框架的快速星图识别方法,该方法能够自动适应指向误差带来的不利影响。利用新疆南山站25 cm 望远镜的图 像对该方法进行测试,达到预期效果,验证其有效性和稳定性。

关键词 图像处理;光学图像处理;星图识别;天文定位;指向搜索中图分类号 TP391.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213252

# Fast Star Pattern Recognition Method Based on Adaptive Pointing Offset

Wang Huachao<sup>1,2\*</sup>, Liu Jing<sup>1,2</sup>, Cheng Haowen<sup>1,2</sup>, Peng Xiyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Xinjiang-25 cm telescope is a small aperture sky survey telescope used to support geostationary earth orbit (GEO) target monitoring tasks. Space object monitoring must rely on fast optical image processing technology and astronomical positioning method to obtain the right ascension and declination measurement information of space objects. The Xinjiang-25 cm telescope has a large pointing error, which significantly affects the success rate of optical image processing. In this study, we analyze the impact of pointing error on star map recognition in astronomical positioning and propose an improved fast star map recognition method based on pointing search that can automatically adapt to the adverse impact of pointing error. This method was tested using the image of the 25-cm telescope at Nanshan station, Xinjiang, and the expected effect was achieved, proving its effectiveness and stability.

Key words image processing; optical image processing; star map recognition; astronomical positioning; direction search

# 1 引 言

空间态势感知需要对尽可能多的空间目标进行全时段监测。对于地球同步轨道(GEO)目标,小口径巡天望远镜具有观测效率高、方便多站部署进行联合观测的优势。新疆25 cm望远镜就是这样一种光学观测设备,负责和光学监测网中的其他望远镜一起进行GEO巡天项目。由于该望远镜的视场较大,每幅图像中的恒星多达千颗,并且每10 s左右就会产生1幅图像,这给图像处理系统带来一定压力。其次,这台望远镜的转台属于经济型,指向精度不高,指向误差经常会

达到1°以上。除此之外,由于这种光学望远镜要部署 于全球各处,观测条件各有不同,可能会受到各种误差 的影响。因此,需要研发一种具有很强适应能力的光 学图像处理软件。

光学监测设备需要对关注的空间物体进行定期观测,将这些物体统称为目标。观测后获得光学图像数据,需要处理得到目标的天球位置信息,通常采用天文定位方法<sup>[1]</sup>。天文定位采用相对定位的原理,首先依据恒星星表得到CCD图像中背景恒星的精确天球位置,构建图像坐标到天球坐标的映射关系,然后利用图像中目标星像与背景恒星的相对位置计算目标的精确

先进成像

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-05; 录用日期: 2022-01-11; 网络首发日期: 2022-01-21

**基金项目**:国家自然科学基金(11803052)

通信作者: \*huachaow@nao. cas. cn

天球位置。经过图像预处理和星象特征计算后,可以 得到恒星星象的中心位置,然后将其与星表中的恒星 进行一一配对,从而得到恒星的天球位置。这是天文 定位的关键步骤,称为星图识别(星表匹配)。对于视 场较大的望远镜,图像中的恒星数多达上千颗,并且观 测过程会受到温度、天气等多种因素的影响,导致星象 位置误差较大,增大了星图识别的复杂度,对天文定位 计算的精度、速度和成功率具有直接影响。

星图识别将图像中的恒星和星表中的恒星进行匹 配,从而识别图像恒星的身份,因此属于模式识别问 题。早期星图识别方法有直接匹配法、角距匹配法,后 来还有栅格法、神经网络识别法、等等[2]。工程中使用 最多的是三角形匹配法<sup>[2]</sup>。三角形匹配法以三角形为 基元,在一定误差范围内对图像恒星和星表恒星构成 的三角形进行特征匹配[3]。该算法原理简单,实现比 较方便,因此在工程中应用普遍。但是,三角形匹配算 法简化了识别过程,可能会出现较多伪匹配,且难以纠 正。后人对该算法进行了很多改进,提高了匹配的精 度和速度<sup>[411]</sup>。Mortari等<sup>[4]</sup>提出金字塔算法(又称多边 形算法),使用四颗图像恒星构造的多边形,与星表恒 星构造的多边形进行匹配。该算法虽然在处理精度和 成功率上有优势,但对于含有较多恒星的图像,算法的 计算量和内存消耗都将大大增加。Tabur<sup>[5]</sup>提出快速 三角形匹配算法,对描述三角形的特征量进行了重新 定义,先按特征进行排序,优先在三角形稀疏的区域进 行匹配,不仅大大提高了识别的成功率,还减少了匹配 数量,提高了匹配速度。

本文对快速三角形方法存在的问题进行分析,对 指向误差带来的误匹配进行改进,通过指向搜索解决 指向误差问题,增强算法的自适应性,提出一种基于指 向搜索的新星图识别方法。该方法在不显著提高计算 复杂度的同时,提高了星图识别的成功率和稳定性。

## 2 星图识别问题分析

#### 2.1 新疆 25 cm 望远镜的指向误差问题

新疆25 cm望远镜建成于2017年,部署在新疆天 文台南山观测站(图1),是一台赤道式望远镜。该望 远镜的焦距为625 mm,采用的CCD尺寸为36 mm× 36 mm。它的视场为3.3°,每晚可对全天区的GEO目 标观测1~2次。

该望远镜的转台精度不高,指向误差一般在0.2° 左右,因此运行前期需要大量调试。除了定期进行望 远镜指向的校正外,还对配套的图像处理软件进行数 周的调试,从而调整参数使其基本适应望远镜的指向 误差问题。由于该图像处理软件需要人工进行大量参 数调优,难以适应大规模部署任务。因此,需要研发新 的以三角形匹配为基础、适应性更强的快速图像处理 系统。



图 1 新疆南山站的 25 cm 望远镜 Fig. 1 25-cm telescope at Nanshan station in Xinjiang

#### 2.2 三角形匹配

1986年,为了提高星表匹配算法对望远镜光学畸 变等误差的容忍度,Groth<sup>[3]</sup>提出三角形匹配算法。该 算法具有抗坐标平移、旋转、放大的优点。三角形匹配 原始算法的相关内容如下。

算法1 三角形匹配算法

输入:光学图像的恒星信息、星表信息

输出:图像恒星到星表恒星的映射

1) 从图像中选取 $N_1$ 颗恒星组成列表A,从星表中 提取对应视场内的 $N_2$ 颗恒星组成列表B,都按亮度进 行排序;

2)构造A和B的三角形,三角形用(R, C)表示。 R代表三角形长边和短边的比值,C表示长边和短边 之间夹角的 cos 值;

3) 进行匹配, 三角形特征比较的差距若满足  $(R_A - R_B) < E_R \pm (C_A - C_B) < E_C 则视为匹配成功, E_R$ 和 $E_c$ 是设定的特征匹配阈值;

4) 去除矛盾匹配;

5) 投票决定 A 中恒星到 B 中恒星的映射。每个 匹配上的三角形为其包含的三颗恒星映射各投一票, 票多者胜出。

三角形算法对阈值选取有一定要求,要综合考虑 匹配的准确性和结果的可用性。阈值设置偏小,三角 形匹配的准确度比较高,但匹配上的三角形会比较少, 恒星映射的投票数可能达不到最低要求。阈值设置偏 大,匹配正确的三角形会增多,但匹配错误的三角形也 会增多,可能导致匹配错误的三角形个数超过正确的 三角形个数。因此,阈值的设定对该算法来说比较关 键,一般由人根据经验设定。这也影响了该算法在实 际应用中的鲁棒性,如果设置不好,可能导致处理 失败。

从算法步骤可以看出,计算速度的瓶颈在于三角 形的构造和匹配。构造三角形的个数随着恒星数*n*的

增大会呈几何级增长,三角形个数越多,匹配消耗的时间越长,而且存储三角形也要消耗一定的内存空间。

## 2.3 快速三角形匹配

为了提高三角形匹配的速度,Tabur<sup>[5]</sup>于2007年 提出快速三角形匹配算法。该算法重新定义三角形, 用(*x<sub>i</sub>*, *y<sub>i</sub>*)表示:

$$\begin{cases} x_t = \overrightarrow{CB} \cdot \overrightarrow{CA} \\ y_t = \frac{a}{c} \end{cases}, \tag{1}$$

式中:*CB*(*a*)为三角形最长的那条边;*CA*为三角形中 等长度的那条边;*c*为最短的那条边;三角形的第1个 分量*x*是最长边和中长边的向量点积;第2个分量*y*是 最长边和最短边的边长比值。相较于三角形算法,该 公式引入图像的像素比例尺,需要从图像文件的头信 息中读取。图像恒星的角度坐标可以由它的像素坐标 和像素比例尺计算得到,从而在测量单位上和星表恒 星达成一致。加入像素比例尺后,特征在数值上的分 布范围扩大了,使得三角形的密度变低,进而需要匹配 的三角形个数就大大减少了。快速三角形匹配算法的 相关内容如下。

算法2 快速三角形匹配算法

输入:光学图像的恒星信息、星表信息

输出:图像恒星到星表恒星的映射

1) 构造图像三角形列表I和星表三角形列表S;

2) 三角形列表 I和S都按y值从大到小排序;

3) 从 y 值最大的三角形开始,对于一个 I 中待匹配三角形,在候选 S 三角形中采用二分法查找 y 值,然后判断 x 值是否满足误差阈值;

4)检查匹配成功的三角形是否能构建底片模型, 如果不能则抛弃;

5) 匹配上的三角形达到预定个数则退出;

6)最后重新计算底片模型,借此计算图像恒星的 天球坐标,按距离最近原则查找所有恒星映射。

快速三角形匹配算法优先选择 y 值大、三角形分 布稀疏的区域进行匹配,因此计算速度快、匹配成功率 高。该算法认为其选择的三角形匹配都是正确的,因 此不必采用投票法决定恒星映射。

2.4 问题分析

快速三角形匹配算法要求图像信息能提供比较准确的望远镜指向。但在实际应用中,并不能保证望远镜一直保持良好的机械精度<sup>[14]</sup>。指向误差越大,三角形匹配成功的概率越低。下面以一幅图像为例进行分析说明,如图2所示。

为了显示清晰,观测图像进行了反色处理,图2中的黑色短线为较亮的恒星,灰色短线为较暗的恒星。 从图中可以看出,视场内可探测到的恒星是很多的。 依据快速三角形匹配算法中的三角形定义,可将图像 中最亮的20颗恒星构造的所有三角形绘制出来,在





图 3 中用红色方框表示。为了方便分析,依据 flexible image transport system (FITS)图像给出的望远镜指 向,将视场内的星表恒星提取出来,选择最亮的40颗 恒星构造三角形,同样绘制在图3中,用蓝色圆点表 示。匹配所用的星表恒星比图像恒星要多,主要是因 为星象提取得到的恒星亮度并不准确,为了尽可能匹 配成功,扩大了星表恒星的使用范围。



图 3 指向误差对快速三角形匹配的影响 Fig. 3 Influence of pointing offset on fast triangle matching

然后采用快速三角形匹配算法进行计算。匹配上 的三角形在图 3 中用绿线连接起来,并用绿色圆圈进 行标识。从图 3 可以看出,纵坐标值最大的几个图像 三角形还可以匹配成功。但从第 21 个图像三角形开 始,其所处区域的星表三角形分布就已经很密集。如 果阈值选取不合适,就很可能匹配出错。其实,第 11 个 三角形就已经匹配错了。

指向误差越大,对应视场内的星表恒星与图像相 交的区域就越小,即同时存在于星表子集和图像中的 恒星越少。相交区域变小后,星表和图像三角形的交 叠情况也会发生变化。可能会出现下面这种情况,在 比较稀疏的图像三角形区域,其对应的星表三角形的 分布却很密集。这将导致三角形匹配成功的概率大大 降低。

另一方面,为了保证底片模型的精度,希望匹配上的恒星越多越好,这就要求交集内的恒星越多越好。 要增加相交区域内的恒星数,就要提取更多的星表恒 星,构造三角形后进行比对。由于恒星不断增多,三角 形的密度开始升高,匹配成功的概率随之下降。图4 展示了新疆25 cm望远镜图像的仿真实验结果。随着 指向误差逐渐增大,匹配成功率迅速降低,图像处理失 败比例大大增加。因此,在实际应用中,快速三角形匹 配算法的处理成功率是打折扣的。





最后需要说明的是,为了判别三角形匹配是否成 功,需要选取合适的判别阈值。当三角形分布比较密集 时,设定阈值就成为一项挑战。在实际使用中,为了具 备更高的适应性,一般会设置相对宽松的阈值,用来减 轻光学畸变和天气等因素导致的星象定心不准、光度测 量精度不高的影响。日常观测中,恒星在图像中并不是 均匀分布的,导致对应的三角形空间的密度分布也会有 很大变化。当三角形区域密度过大时,难以保证凭经验 设定的阈值不会判别出错。

综合分析发现,受指向误差干扰,Tabur提出的快速三角形算法丢失了快速找到三角形正确匹配的优点。 该算法需要大大增加迭代次数,来满足底片模型计算的 需求,从而找到足够的匹配三角形,因此将消耗大量 时间。

为了应对实际应用中各种因素带来的误差,同时 保证快速、及时处理图像,需要设计一种能够适应误差 带来的影响并进行快速计算的算法,同时还要尽可能 提高匹配的准确性和处理成功率。本研究在原快速三 角形匹配算法基础上进行扩展,增加指向搜索模块来 应对指向误差问题,通过迭代计算底片模型来提高匹 配准确性,并对三角形构造、三角形匹配、底片模型计 算等多个环节进行优化,使得所提算法在实际应用中 保证快速处理的同时具有很好的稳定性。

# 3 基于指向搜索的快速星图识别

光学图像处理面对的是海量的图像数据,处理速 度是需要重点关注的问题。快速三角形匹配算法具有 处理速度快的优势。但三角形匹配算法有一个共同的 缺点,在视场内的恒星比较密集时,比较容易出现较多 的相似三角形,所以容易匹配出错,且不容易纠正。因 此,基于三角形匹配的光学图像处理要尽可能基于先 验知识去掉不相关的恒星,减少视场内的恒星数,避免 误匹配。同时需要提高望远镜指向精度,这样就可以 避免引入过多视场外的恒星参与匹配。

对于指向精度问题,最先想到的解决办法可能是扩 大匹配视场。例如,假设指向误差为0.1°,原始视场为 1°,如果将匹配视场增大到1.2°,就可以将误差导致的 原本在匹配天区之外的恒星信息都提取进来进行星表 匹配,从而有可能匹配成功。对于指向误差不大且视场 内恒星不多的情况(比如小于10颗),这种方法是有效 的。但实际应用中,指向误差可能远远大于0.1°,视场 内的恒星数多达成百上千颗。扩大匹配天区会引入过 多无关恒星,产生大量误匹配,也会大大增加计算量。

对于大视场望远镜,通常会选取图像视场中心的 一块区域进行星表匹配,称之为匹配区域。为了尽量 减少匹配区域内的恒星数并兼顾底片模型计算对恒星 数量的需求,需要将匹配区域缩小到合适的大小。假 设选择图像中最亮的20颗恒星进行星表匹配,可以计 算得到这20颗恒星的区域中心以及区域大小,则提取 星表恒星时的区域大小应与其相当。由于匹配区域比 较接近,如果指向比较准确,则图像恒星和星表提取出 的恒星匹配成功的概率很大。这对匹配区域中心的位 置精度提出了一定要求。在指向误差不确定的情况 下,本研究设计了以指向搜索为框架的快速星表匹配 算法,期望能提高指向精度。为了应对三角形匹配容 易出错的问题,本研究设计了迭代算法来去除错误匹 配,尽量减少阈值设置不合适导致的三角形误匹配对 恒星映射产生的影响。

图 5展示了指向搜索进行星表匹配的流程。首 先,从图像中选取最亮的N颗恒星,统计这些恒星位 置,重新计算要进行星表匹配区域的大小和中心。然 后,基于该区域大小和指向误差搜索范围,生成指向搜 索序列,以一定步长在原始指向附近逐步尝试。每次 尝试要进行以下操作:1)提取搜索指向对应天区的星 表恒星;2)构造图像恒星三角形和星表恒星三角形; 3)采用改进的快速三角形匹配算法进行星表匹配; 4)投票选出恒星映射,用于底片模型计算,若底片模型 计算成功则退出搜索循环。

最后,采用计算成功的底片模型修正望远镜指向, 就可以基于距离最近原则,为每一颗图像恒星寻找到 对应的星表恒星,获取到它们的星表位置后重新计算





精度更高的底片模型。下面对算法的一些步骤进行详 细介绍。

#### 3.1 指向搜索

以初始指向为中心,由内向外,以一定间隔逐步尝 试可能指向的过程即为指向搜索。搜索的间隔(步长) 越小,找到的望远镜指向的精度越高,但计算量也越 大。为了平衡好搜索速度和精度,需要选择合适的搜 索步长。通过指向搜索,可以在一定精度内找到近似 正确的望远镜指向。

指向搜索包括3步:1)生成指向搜索序列;2)选取 某一指向进行星表匹配和底片模型计算;3)如果计算 成功则退出,否则尝试下一指向。首先介绍固定步长 搜索序列生成算法。该算法的输出为指向的修正量序 列,序列中的某一修正量加上原始指向即为需要尝试 的搜索指向。

算法3 固定步长指向搜索
输入:原始中心指向;步长S;最大搜索半径R<sub>L</sub>
输出:搜寻序列(以修正量表示)
1)序列初始化;
2)序列中加入原始中心指向(0,0);
3)设置起始搜索半径R=1,单位为步长;
4)设置赤经搜索起始步数N=0;
5)计算赤经指向修正量M<sub>R</sub>=S×N;
6)设置赤纬搜索起始步数M=0;
7)计算赤纬指向修正量M<sub>D</sub>=S×M;
8)若N=0且M=0,转步骤13);

9) 若N<R且M<R,转步骤13);

10) 若 N=0 且  $M\neq 0$ , 序列加入元素(0,  $M_{\rm D}$ )和(0,  $-M_{\rm D}$ );

11) 若  $N \neq 0$  且 M = 0, 序列加入元素  $(M_{R}, 0)$ 和  $(-M_{R}, 0)$ ;

12) 若  $N \neq 0$  且  $M \neq 0$ , 序 列 加 入  $(M_{R}, M_{D})$ 、  $(-M_{R}, M_{D})$ 、 $(M_{R}, -M_{D})$ 和 $(-M_{R}, -M_{D})$ ;

13) 增加赤纬步数, *M*=*M*+1, 若*M*>*R*, 转步骤 14), 否则转步骤 7);

14) 增加赤经步数, N=N+1, 若 N>R, 转步骤 15), 否则转步骤 5);

15) 增加搜索半径, R=R+1;

16)如果R大于最大搜索半径R<sub>L</sub>则转步骤17), 否则转步骤4);

17) 返回搜索序列。

固定步长搜索策略的精度比较稳定,但搜索速度 受到限制。一般认为,指向误差呈高斯分布,即原始指 向附近搜索成功的概率最高,距离越远概率越低。因 此,在原始指向附近需要以小步长进行搜索,以便找到 精度较高的指向,距离越远步长应该更大。基于该假 设,可以采用变步长进行搜索,即初始步长很小,后续 逐渐增大步长。

算法4 变步长指向搜索算法

输入:原始中心指向;起始步长S<sub>0</sub>;最大搜索半径 R<sub>1</sub>;最大步长S<sub>1</sub>

输出:搜寻序列(以修正量表示)

1) 序列初始化;

- 2) 序列中加入原始中心指向(0,0);
- 3) 设置起始搜索半径 R=1,单位为步长;
- 4) 设置步长 $S=S_0 \times R$ ,如果 $S>S_L$ ,则 $S=S_L$ ;
- 5) 设置赤经搜索起始步数 N=0;
- 6) 计算赤经指向修正量 $M_{R}=S\times N$ ;
- 7) 设置赤纬搜索起始步数*M*=0;
- 8) 计算赤纬指向修正量 $M_{\rm D}=S \times M$ ;
- 9) 若 N=0 且 M==0,转步骤 14);
- 10) 若*N*<*R*且*M*<*R*,转步骤14);
- 11) 若N=0且 $M\neq 0$ ,序列中加入元素(0, $M_{\rm D}$ )和(0, $-M_{\rm D}$ );

12) 若  $N \neq 0$  且 M = 0, 序列加入元素  $(M_{R}, 0)$  和  $(-M_{R}, 0)$ ;

13) 若  $N \neq 0$  且  $M \neq 0$ , 序列加人元素  $(M_{\rm R}, M_{\rm D})$ 、 ( $-M_{\rm R}, M_{\rm D}$ )、 $(M_{\rm R}, -M_{\rm D})$ 和 $(-M_{\rm R}, -M_{\rm D})$ ;

14) 增加赤纬步数, *M*=*M*+1, 如果*M*>*R*, 转步骤15), 否则转步骤8);

15) 增加赤经步数, N=N+1, 如果 N>R, 则转步 骤 16), 否则转步骤 6);

16) 增加搜索半径, R=R+1;

17) 如果 *R*大于最大搜索半径则转步骤 18),否则 转步骤 4):

## 3.2 构造三角形

18) 返回搜索序列。

所采用的三角形定义和快速三角形匹配算法类 似,除了原来的特征和,定义中还增加了最长边的边长 值、最长边和中长边的边长比值、中长边和最短边的边 长比值,因此可使用更多特征,匹配准确的可能性更 大。三角形用(*x*, *y*, *z*, *u*, *v*)表示:

 $\begin{cases} x = \overrightarrow{CB} \cdot \overrightarrow{CA} \\ y = \frac{a}{c} \\ z = \frac{a}{b} \\ u = \frac{b}{c} \\ v = a \end{cases}, \qquad (2)$ 

式中:a为最长边;b为中长边;c为最短边。理论上, n颗恒星可以构造n(n-1)(n-2)/6个三角形。为了 减少三角形的个数,在构造待匹配恒星(图像恒星)三 角形时,会先统计所有三角形边长的最大值和最小值, 然后在构造已知恒星(星表恒星)三角形时,使用刚才 统计的最大值和最小值进行过滤。经过过滤后,待匹 配三角形的个数大大减少,也降低了匹配出错的概率。

#### 3.3 快速匹配三角形

快速匹配的目的就是尽快为图像恒星三角形找到 与之匹配的星表恒星三角形。后续的底片模型计算需 要有足够数目的恒星映射,相应需要匹配上足够的恒 星三角形。理论上说,匹配上的三角形越多,得到的恒 星映射越多,底片模型计算精度越高。但是,从第2.4 节的分析可以看出:匹配最开始是在分布比较稀疏的 三角形区域进行的,因此识别正确的可能性较高;但随 着匹配个数增加,识别渐渐转入分布密集的三角形区 域,导致三角形匹配正确的概率不断下降,因此恒星识 别的正确率随之下降。

这就需要快速三角形匹配算法具有较好的容错 性。对Tabur提出的快速三角形匹配算法进行如下改 进:一方面采用尽可能多的特征参与匹配,提高匹配正 确率;另一方面,设置宽松的匹配阈值,允许产生符合 条件的多个结果,后续将增加投票模块,通过循环迭代 的方式来去除错误的恒星映射。改进后的快速匹配三 角形算法如下。

算法5 改进的快速三角形匹配算法

输入:图像恒星三角形、星表恒星三角形、匹配阈 值、搜索范围Δ

输出:图像恒星三角形到星表恒星三角形映射

1) 三角形列表都按y值排序;

2) 对于一个待匹配三角形,在候选三角形中采用 二分法查找最接近的 y 值;

3) 在找到的y值附近[ $y - \Delta$ ,  $y + \Delta$ ]寻找满足 匹配阈值的所有三角形;

#### 第60卷第6期/2023年3月/激光与光电子学进展

4)依次检查匹配成功的三角形是否能构建底片 模型,如果不能则抛弃;

5) 从余下的匹配成功的三角形中选择*x*误差最 小的*K*个保存下来(1≤K≤T),T为余下的三角形 个数;

6)继续对下一个待匹配三角形进行处理,若匹配上的三角形达到预定个数则退出;

7) 返回匹配上的三角形映射列表。

## 3.4 迭代去除错误匹配

如前面所述,三角形匹配出错不可避免。若某些 三角形匹配不对,就可能会计算得到相互矛盾甚至是 错误的恒星映射。对此问题进行改进,首先基于三角 形匹配结果对恒星映射进行投票,构造投票矩阵(如表 1所示),然后依据投票结果,通过迭代方法计算底片 模型,从而去除错误匹配。

表1	投票矩阵
Table 1	Voting matrix

Image stor	Catalog star No.				
No.	Catalog star 1	Catalog star 2	Catalog star 3		Catalog star <i>m</i>
Image star 1	0	3	15		
Image star 2	3	23	0		
Image star 3					
÷					
Image star n					

该迭代算法的通过准则是底片模型满足精度要求。底片模型计算完成后,需要计算所用恒星的拟合 天球坐标(由恒星的图像测量坐标经底片模型转换得 到的天球坐标),然后与匹配上的真实天球坐标进行对 比,求标准差。如果该拟合误差小于设定阈值则说明 底片模型满足精度要求。当采用一组恒星映射计算得 到的底片模型满足指定精度时,则说明该组恒星映射 是正确的;否则,错误的恒星映射会导致底片模型精度 变差。迭代算法如下。

算法6 迭代去除错误匹配的算法

输入:三角形映射列表.

输出:图像恒星到星表恒星的映射

1) 依据三角形匹配结果对其包含的恒星映射进行 投票,3颗恒星的映射各投一票,从而形成投票矩阵;

2)删除矛盾的恒星映射,选择投票数最高的4个, 构建初始底片模型;

3) 按照投票数从高到低的顺序,逐个增加恒星映 射,将它们用于底片模型计算;

4) 某个恒星映射加入后,若底片模型自拟合误差大于给定阈值,则弃用该恒星,否则继续加入;

5)所有恒星映射尝试完成后,若底片模型自拟合 误差满足指定阈值(例如小于3"),则退出指向搜索的 循环,否则返回失败,继续下一指向搜索; 6) 返回底片模型所用的正确恒星映射。

#### 3.5 计算底片模型

底片模型既是天文定位的输出,也可以用于决策 星图识别是否成功,作为算法退出循环的条件。底片 模型<sup>[15]</sup>是一个转换方程,原理如图6所示。望远镜指 向天球,*c*点是望远镜物镜的中心,穿过*c*点的光轴与 假想球面相交于*A*点,通过*A*点有一个与天球相切的 平面*T*,称为理想平面。这样就建立了理想坐标系,天 球上的恒星通过理想坐标系和底片上的影像构成一一 对应关系。



图 6 投影模型 Fig. 6 Projection mode

恒星 Q的天球坐标( $\alpha, \delta$ )可以转换为理想平面坐标,例如平面 T中的一点 q, q 对应图像中某一测量坐标s。具体转换公式为

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin (\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos (\alpha - A)}, \\ \eta = \frac{\sin \delta \sin D - \cos \delta \sin D \cos (\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos (\alpha - A)}, \end{cases} (3)$$

式中:α为天球赤经;δ为天球赤纬;A为望远镜光轴指向的天球赤经;D为望远镜光轴指向的天球赤结。(A, D)就是图像中心指向。若已知光学图像中某个空间 目标的测量坐标s以及底片模型,即可计算它的理想 平面坐标q,进而通过公式转换得到它的天球坐标Q。 同样,已知图像中恒星的测量坐标,可以由底片模型和 式(3)计算得到该恒星的拟合天球坐标,这样就可以计 算拟合误差,从而判断底片模型是否正确。

底片模型的转换方程为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi} = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 x y + a_6 y^2 + \\ a_7 x^3 + a_8 x^2 y + a_9 x y^2 + a_{10} y^3 + a_{11} x^4 + \\ a_{12} x^3 y + a_{13} x^2 y^2 + a_{14} x y^3 + a_{15} y^4 \\ \boldsymbol{\eta} = b_1 + b_2 x + b_3 y + b_4 x^2 + b_5 x y + b_6 y^2 + \\ b_7 x^3 + b_8 x^2 y + b_9 x y^2 + b_{10} y^3 + b_{11} x^4 + \\ b_{12} x^3 y + b_{13} x^2 y^2 + b_{14} x y^3 + b_{15} y^4 \end{cases}$$
(4)

常用的有6常数模型、12常数模型和20常数模型,分别对应式(4)中关于a和b的前3项、前6项和前

10项。x是恒星在图像中的横轴坐标(测量坐标),y是 恒星在图像中的纵轴坐标,是恒星在理想坐标系的横 坐标,是恒星在理想坐标系的纵坐标。求解底片模型 即是计算*a*和*b*的取值。

求解底片模型需要输入恒星的匹配信息,包括恒 星的图像测量坐标和它对应的天球坐标转换得到的理 想平面坐标。求解底片模型参数时,一般选用最小二 乘法,通过解方程组得到参数取值。

### 3.6 重新计算底片模型及其他

指向搜索找到满足精度要求的底片模型后就会结 束。这时求得的底片模型使用的恒星数较少,这是为 了减少星表匹配的计算量。

为了进一步提高底片模型的精度,还需要使用更 多的恒星信息,因此需要重新计算底片模型。由于这 时的底片模型已经比较准确,可以计算得到图像中每 一颗恒星的拟合天球坐标,然后在星表中按照距离最 近原则寻找其真实的天球坐标。这样可以得到更多的 恒星映射结果,且该映射基本都是正确的。最后,采用 这些恒星映射重新计算,就可以得到精度更高的底片 模型。

处理流程的末尾,采用高精度的底片模型计算图 像中空间目标的天球坐标,输出其结果,即可完成当前 图像的处理工作。

## 4 改进效果

对上述的改进算法进行编程实现,某些细节参考 了一些成熟的天文软件<sup>[16-18]</sup>。由于实际应用中绝大部 分情况下的指向误差都在可容忍的范围内(0.2°以 内),两种指向搜索算法一般都只进行一次尝试即可成 功,因此在批量样本上的效果几乎没有差异。据此,程 序中默认采用变步长指向搜索算法,可以处理2倍视 场大小的指向误差。

下面测试改进算法对指向误差的容忍性。软件运 行的软硬件环境如表2所示。

			0
Item	Element	Configuration	Remark
Hardware	CPU	2.1 GHz, 16 threads	E5-2620
	Memory	16 GB	
	Disk	7200 r/min,2 TB	HDD
Software	System	Windows 7 64 bit	Professional
	Tool	Microsoft Visual Studio 2013	Enterprise
	Language	C++	

表 2 测试的硬件和软件环境 Table 2 Hardware and software for testing

处理新疆25 cm望远镜的图像,选取其中678幅图 像作为测试输入,每幅图像选择星等最小的40颗恒星 进行星图识别。显然,匹配的恒星数越多,计算耗时越 长,内存消耗越大,并且软件运行时间会呈几何级增 长。首先测试改进算法对指向误差的适应性,结果如

#### 第 60 卷 第 6 期/2023 年 3 月/激光与光电子学进展

图 7 所示。从图中可以看出,批量测试的整体效果稳定,指向误差在1°以内的匹配成功率接近100%。



图7 改进算法后指向误差对匹配成功率的影响

Fig. 7 Influence of pointing offset on matching success for improved algorithm

上述图形有微小波动,这是因为指向误差对极个 别图像的影响较大。这些图像由于天气等原因拍到的 恒星较少(少于20颗)且某些恒星定心精度较差,指向 误差变大导致图像和星表的交集过小,星表匹配的结 果不足以支持底片模型计算成功(至少使用4颗恒 星)。由于图像恒星数较少,提高指向精度可以尽可能 将它们圈在匹配区域内,从而最大限度地使用好这些 恒星信息。这样就需要设定较小的指向搜索步长,从 而导致搜索次数大大增加,可能会消耗大量计算时间。

指向误差对计算耗时的影响如图8所示。指向误 差超过0.5°以后,平均每幅图像的计算耗时呈指数增 长。这是因为迭代计算底片模型算法可以容忍0.5°以 内的指向误差(针对3.3°视场),即1次指向搜索即可 星表匹配成功。指向误差超过0.5°以后,指向搜索开 始进行多次循环,从而导致重新提取星表恒星构造三 角形并进行星表匹配,因此计算耗时成倍增加。



Fig. 8 Influence of pointing offset on compute time for improved algorithm

虽然指向搜索算法可以处理2°以上的指向误差, 但其计算耗时已远超预期。综合实际考虑,指向误差 超过1°时建议对望远镜进行维护,校正望远镜指向。

采用 2000 多幅图像进行大批量测试,结果表明, 星图识别平均耗时少于 30 ms,底片模型计算及天文 定位结果生成模块平均耗时少于 3 ms。星图识别平 均匹配成功恒星数超过 60颗,底片模型拟合标准差平 均小于 3"。

# 5 结 论

为了应对新疆25 cm望远镜的指向误差问题,研 发适应能力强的图像处理系统,分析快速三角形匹配 算法在实际应用中的一些问题,提出一种能自适应指 向误差的快速处理算法。该算法在保持快速处理的情 况下,通过投票和迭代方法去除错误匹配,提高星表匹 配的准确性,采用指向搜索增强算法的适应性和稳定 性,解决指向误差问题。软件实际测试结果表明,改进 算法达到预期效果,能够适应较大的指向误差。目前 软件处理的观测天数还不多,待将来观测数据丰富后, 可在多设备、大规模样本上对该算法进一步优化,使其 适用于更多的光学设备。

#### 参考文献

- 孙荣煜,赵长印.GEO空间碎片的光学观测与精密定位[J].天文学进展, 2012, 30(3): 394-410.
   Sun R Y, Zhao C Y. Optical survey technique for space debris in GEO[J]. Progress in Astronomy, 2012, 30(3): 394-410.
- [2] 张会彦.卫星光学测量方法与精密定轨研究[D].西安: 中国科学院国家授时中心, 2014.
   Zhang H Y. The optical measurement method and precise orbit determination for the satellite[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [3] Groth E J. A pattern-matching algorithm for twodimensional coordinate lists[J]. The Astronomical Journal, 1986, 91(5): 1244-1248.
- [4] Mortari D, Samaan M A, Bruccoleri C, et al. The pyramid star identification technique[J]. Navigation, 2004, 51(3): 171-183.
- [5] Tabur V. Fast algorithms for matching CCD images to a stellar catalogue[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2007, 24(4): 189-198.
- [6] Murtagh F. A new approach to point-pattern matching[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific,

#### 第 60 卷 第 6 期/2023 年 3 月/激光与光电子学进展

1992, 104:301.

- [7] Spratling B I V, Mortari D. A survey on star identification algorithms[J]. Algorithms, 2009, 2(1): 93-107.
- [8] Marszaek M, Rokita P. Pattern matching with differential voting and median transformation derivation [M]//Wojciechowski K, Smolka B, Palus H, et al. Computer vision and graphics. Computational imaging and vision. Dordrecht: Springer, 2004, 32: 1002-1007.
- [9] Griffin P M, Alexopoulos C. Point pattern matching using centroid bounding[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5): 1274-1276.
- [10] Paladugu L, Williams B G, Schoen M P. Star pattern recognition for attitude determination using genetic algorithms[C]//17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, August 11-14, 2003, Logan, UT, USA. [S.l.: s.n.], 2003.
- [11] Lang D, Hogg D W, Mierle K, et al. Astrometry.net: blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images
   [J]. The Astronomical Journal, 2010, 139(5): 1782-1800.
- [12] 孙兴哲,张锐,师晨光,等.基于动态夹角匹配的星图 识别算法[J].光学学报,2021,41(16):1610001.
  Sun X Z, Zhang R, Shi C G, et al. Star identification algorithm based on dynamic angle matching[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1610001.
- [13] 闫旭亮,徐望,杨功流,等.基于改进对数极坐标变换的星图识别算法[J].光学学报,2021,41(10):1010001.
  Yan X L, Xu W, Yang G L, et al. Star map recognition algorithm based on improved log-polar transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1010001.
- [14] Sun R Y, Lu Y, Zhao C Y. A method for correcting telescope pointing error in optical space debris surveys[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2016, 40(1): 66-78.
- [15] 范良艳.基于不同取向的CCD图像准确求解底片常数 模型[D].广州:暨南大学,2010.
  Fan L Y. Accurate determination of plate model based on CCD images with different orientations[D]. Guangzhou: Jinan University, 2010.
- [16] Devyatkin A V, Gorshanov D L, Kouprianov V V, et al. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations[J]. Solar System Research, 2010, 44(1): 68-80.
- [17] Kouprianov V. ISON data acquisition and analysis software[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris, April 22-25, 2013, Darmstadt, Germany. [S.I.]: ESA, 2013.
- [18] Massey P. A user's guide to CCD reductions with IRAF
   [EB/OL]. (1992-06-30) [2021-02-05]. http://212.193.72.50/ docs/iraf/ccduser2.pdf.