

## 基于GPU的小行星光学观测图像实时处理

兀颖, 葛亮, 卢晓猛, 田健峰, 王汇娟, 姜晓军

引用本文:

兀颖, 葛亮, 卢晓猛, 等. 基于GPU的小行星光学观测图像实时处理[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2527–2534.

WU Ying, GE Liang, LU Xiao-meng, et al. A method of real-time data reduction of asteroid optical observation image based on GPU[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2527–2534.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2527>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究

Study on observation simulation for space-based potentially hazardous asteroids warning mission on Earth trailing heliocentric orbit

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2563–2571 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2563>

### 近地小行星基本物理性质的测光研究

Photometry studies of physical properties for Near-Earth asteroids

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2549–2562 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2549>

### 基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测

Dim moving target detection based on fluctuation analysis

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2517–2526 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2517>

### 基于预分割和回归的深度学习目标检测

Deep learning target detection based on pre-segmentation and regression

*光学精密工程*. 2017, 25(10s): 221–227 <https://doi.org/10.37188/OPE.20172513.0221>

### 小行星光学导航传感器技术发展趋势

Development trend of optical navigation sensor technology for asteroid exploration

*光学精密工程*. 2017, 25(12z): 1–17 <https://doi.org/10.37188/OPE.20172514.0001>

文章编号 1004-924X(2020)11-2527-08

# 基于 GPU 的小行星光学观测图像实时处理

兀 颖<sup>1,2</sup>, 葛 亮<sup>1</sup>, 卢晓猛<sup>1</sup>, 田健峰<sup>1</sup>, 王汇娟<sup>1,2</sup>, 姜晓军<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院 光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 小行星地基光学观测是小行星搜寻和性质研究的重要手段。近年来, 小行星搜寻项目朝着大口径大视场的方向发展, 探测能力提升的同时数据量也大大增长, 为了提高小行星光学观测图像的处理速率, 本文提出基于 GPU 的小行星光学观测图像实时处理方法。对 Source Extractor 算法进行研究, 在满足提取精度的前提下, 实现 Source Extractor 算法的简化和基于 GPU 的并行化; 同时, 采用 Match 匹配算法进行天文定位, 并对 Match 匹配算法进行优化, 提高算法适用性和准确率。实验结果表明: 利用 NVIDIA GeForce GTX 2080Ti 显卡搭建的实验平台实现简化和并行化后的算法, 相比于 CPU 下的串行算法, 提速比可达 17(S/N 阈值设置为 3), 且随着高性能显卡的进一步发展, 提速比还有提升空间, 此方法还适用于其他光学巡天观测图像的处理。

**关键词:** 小行星光学观测, 目标提取, GPU, 并行算法

中图分类号: V528 文献标识码: A doi: 10. 37188/OPE. 20202811. 2527

## A method of real-time data reduction of asteroid optical observation image based on GPU

WU Ying<sup>1,2</sup>, GE Liang<sup>1</sup>, LU Xiao-meng<sup>1</sup>, TIAN Jian-feng<sup>1</sup>, WANG Hui-juan<sup>1,2</sup>, JIANG Xiao-jun<sup>1,2\*</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

\* Corresponding author, E-mail: xjjiang@nao.cas.cn

**Abstract:** Ground-based optical observation is an important means of asteroid detection and property research. In recent years, asteroid survey projects have developed toward larger apertures and larger fields of view. While the detection capability has increased, the amount of data has also increased greatly. To improve the speed of asteroid data reduction, a graphics-processing-unit-based real-time processing method for asteroid optical observation images was proposed. Based on a previous target extraction algorithm, we realized the parallelization of target extraction, researched the Source Extractor algorithm, simplified and parallelized the Source Extractor code, and improved the Match algorithm to improve both applicability and accuracy. The experimental results show that the simplified, parallelized algorithm implemented in an experimental platform built based on the NVIDIA GeForce GTX 2080Ti graphics card offers an increase in speed by a factor of up to 17 (with the signal-

收稿日期: 2020-04-20; 修订日期: 2020-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金重点资助项目(No. U1831209); 民用航天预研项目资助(No. D020302); 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFA0400804)

to-noise threshold set to 3) compared with that of a serial algorithm running on only a central processing unit. With the further development of high-performance graphics cards, there is room for improvement in speedup ratio, and this method is also suitable for the processing of other optical survey observations.

**Key words:** asteroid optical observation; target extraction; GPU; code parallelization

## 1 引言

小行星的研究已成为国际深空探测领域的研究热点,其研究方向主要包括:太阳系起源和演化;小行星轨道演化机制;小行星的形成和演化;近地小行星风险防御等<sup>[1-2]</sup>。小行星的探测主要分为地面观测和空间探测,利用地基光学望远镜进行小行星观测是目前小行星搜寻和性质研究的主要手段。其中,卡特琳娜巡天系统(Catalina Sky Survey, CSS)用于发现和跟踪近地天体(Near Earth Objects, NEOs),该系统中两台巡天望远镜的口径和视场分别是:1.5 m, 15 平方度;0.7 m, 19.4 平方度<sup>[3]</sup>。ATLAS (Asteroid Terrestrial impact Last Alert System, ATLAS) 主要目的是发现对地球有威胁的近地小行星,该系统中目前有两台50 cm口径的望远镜,配备有 STA1600 探测器,探测器像元数为  $10\ 560 \times 10\ 560$ , 视场为 29 平方度<sup>[4-5]</sup>。Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, Pan-STARRS) 也开展了近地天体的搜寻观测, Pan-STARRS1 和 Pan-STARRS2 的口径和视场都分别为 1.8 m, 7 平方度<sup>[6]</sup>。从 2014 年到 2017 年,林肯近地小行星研究小组(Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LINEAR)使用 3.5 m 太空监视望远镜(Space Surveillance Telescope, 简称 SST, 视场为 6 平方度)进行了大范围的小行星搜索<sup>[7]</sup>。

总的来说,小行星地基光学观测设备向着大视场、大口径的方向发展。随着口径和视场的增大,探测能力得到提升,小行星观测时,单帧图像内的恒星数量也大大增多,需要处理的数据量也呈增长趋势。同时,随着科学级高帧频 CMOS 在巡天观测中的应用,如 WFIRST(Weizmann Fast Astronomical Survey Telescope, WFIRST)<sup>[8]</sup> 和 TAOS II(Trans-Neptunian Automated Occultation Surveys, TAOS)<sup>[9]</sup>,对数据处理速度的提升有迫切的要求。ATLAS 系统中每晚需要处理 150 GB 原始数据,为了实现数据的实时处理,该系统中采用两台 28 核,内存为

128 GB 的机架式服务器处理数据<sup>[4-5]</sup>。如何提高数据处理速度,是小行星数据处理中需要考虑的一个问题。

对程序进行并行化是提升数据处理速度的一种有效方式。ATLAS 系统采用 CPU 多线程加快数据处理的速度<sup>[4-5]</sup>。现有的主要并行化处理方法有:基于 CPU 的并行化、基于 GPU 的并行化、FPGA 硬件并行化。基于 CPU 的多线程并行计算,处理速度的提升依赖于 CPU 核数,单台设备速率提升空间有限,集群和超级计算机则成本极高;FPGA 属于纯硬件加速,需由专用硬件语言开发,处理速度最快,但算法转换为硬件语言相对不易,成本较高。

图像处理器(Graphic Processing Unit, GPU)也称众核处理器,不同于 CPU, GPU 将更多的晶体管用于执行单元,在处理单元数量上远超 CPU,因此, GPU 在处理速度和存储带宽上相对 CPU 有明显的优势。GPU 初期只是应用于图像渲染,随着技术的发展和 GPU 新架构的提出, GPU 广泛应用于通用计算领域,近年来 GPU 也应用于人工智能领域(Artificial Intelligence, AI)。因此,考虑到开发周期、开发成本、速率提升率,本论文采用基于软件和硬件结合的 GPU 加速方式提升小行星光学观测图像的处理速度。

## 2 小行星数据处理流程

小行星前期数据处理的目的是为了获取其基本信息,用于后期定轨,数据处理的流程如图 1 所示。

首先对原始图像进行处理,提取背景;用目标图像减去背景图像,获取只包含目标的图像,进行目标检测,提取出目标信息;计算目标基本信息;与标准星表进行匹配,进行恒星证认,确认靶面坐标系和天球坐标系之间的转换关系,计算转换方程;监测连续多帧图像中提取出目标的位置变化,

检测出备选小行星。

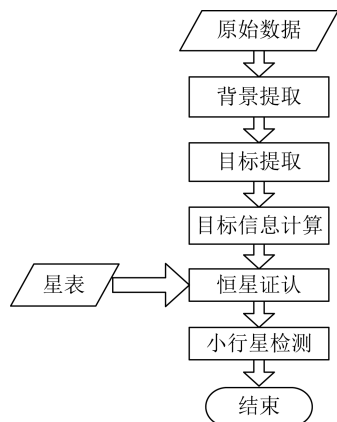


图 1 小行星数据处理流程

Fig. 1 Pipeline of asteroid data reduction

### 3 基于 GPU 的并行化目标提取

小行星和恒星的视运动速度不同<sup>[10]</sup>,在观测图像中根据观测模式的不同呈现点像或拖长像。天文图像处理中一般采用孔径测光获取目标的信息,通过采用不同半径的圆形孔径分别圈出目标信息(含背景信息)和背景信息,通过扣除背景信息获取目标信息。但对于非圆形目标,孔径测光不再适用。

Source Extractor(SExtractor)是一套从巡天图像中检测天体并提取天体星等、位置等信息的开源软件<sup>[11]</sup>。SExtractor 适用于提取不同形状和大小的目标,且提取算法的鲁棒性较好,也适用于提取拖长星象,可用于小行星光学观测图像处理。然而,SExtractor 算法是串行的,随着图像增大和图像中目标数量的增多,处理速度难以提升。因此本文通过将 SExtractor 算法简化和并行化后,使其可以在 GPU 平台上运行,大幅提高了数据处理速度。

#### 3.1 背景提取

采集到的原始图像包含目标信息、天光背景信息、本底等,为了获取目标的准确信息,需要扣除背景和本底等信息。背景由于构成复杂,在大尺度( $10^2$  像素量级)和小尺度(10 像素量级)上都存在不均匀性,大视场望远镜这一现象尤为明显,不能用单一值替代。

SExtractor 通过结合  $K-\sigma$  Clipping 法和模式估计法拟合背景<sup>[11]</sup>,对图像进行分割,提取子图

特征信息,拟合出背景图像。整个计算过程计算量大,且随着视场增大和探测能力增强,图像中包含背景星增多时,SExtractor 算法中原本就耗时较大的 Detection 过程和 Deblending 过程会需要更多的处理时间<sup>[6]</sup>,因而应用串行的 SExtractor 算法将无法及时处理大量高帧频的数据。

#### 3.2 背景提取并行化

分析 SExtractor 背景提取算法,有以下特点:背景提取算法中,子图之间的计算相关性小,相互依赖关系较弱;计算过程有输入大数据量,输出小数据量的情况;计算过程有输入小数据量,输出大数据量的情况。这些特点均适合应用 GPU 并行化进行加速。

对 SExtractor 各个过程均进行并行化,主要并行化方式如下:(1)图像分割成的  $N \times N$  子图,子图和子图相互之间没有迭代关系,并行化计算均值、方差,进行高斯统计;(2)对滤波算法和样条插值算法进行算法内并行化,三次样条插值的计算是一个小数据量到大数据量的过程,行和行之间的插值计算及列和列之间的插值计算依赖性低,通过对计算过程进行分解,行插值和列差值分别并行计算。以  $4\,096 \times 4\,096$  图像为例,图像分块示意图如图 2 所示,并行化背景提取处理过程如图 3 所示,背景提取部分计算量和并行度如表 1 所示,算法并行化程度和子图数量正相关。

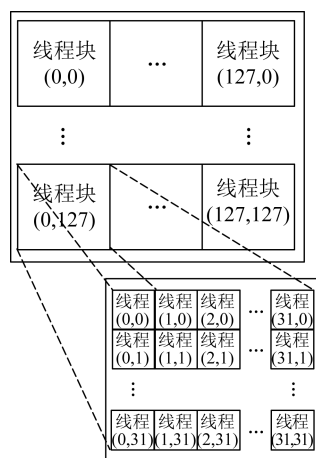


图 2 图像分块示意图

Fig. 2 Diagrammatic drawing of image segmentation

同时在统一计算设备架构 CUDA C(Compute Unified Device Architecture,CUDA) 程序编写过程中采用以下措施提升 GPU 处理速度:

(1)减少 CPU 内存到 GPU 内存之间的拷贝次数,仅进行一次拷贝;

(2)合理设置 Grid 和 Block 大小,子图大小设置为 32 或者 16 的倍数;

(3)在精度保证的前提下,CUDA C 中数据类型采用 float 替代 double。

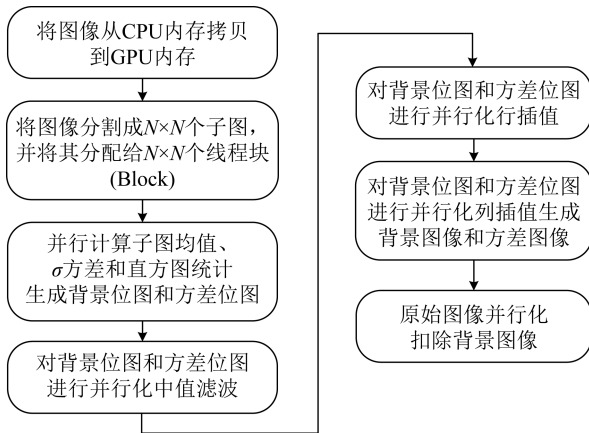


图 3 并行化背景提取流程图

Fig. 3 Flow chart of parallel background extraction

表 1 4K×4K 图像背景提取部分计算量和并行度

Tab. 1 Computation and parallelism of 4K×4K image back background extraction

函数功能	计算量(G次)	并行度
背景统计	2.982 5	子图(128×128)并行, 子图内部并行
y 求导方向插值	0.031 3	位图列并行(128)
x 方向求导插值	1.563 1	图像行并行(4 096)

### 3.3 目标提取并行化

经过背景扣除后的图像保留了包含目标信息的一个个独立像元,如何将一个个独立的像元形成目标,是目标检测需要解决的问题。

Zhao 等<sup>[12]</sup>对 SExtractor 算法实现了 GPU 下的并行化,本文中的目标提取并行化算法基于该文章中的目标提取方法,并进行了简化。SExtractor 的目标检测算法为了适用于巡天图像中星系的提取和轮廓重叠的目标源的提取,采用了多阈值算法(SExtractor 算法中的 Deblending 过程和 Clearing 过程)进行多次迭代。

SExtractor 算法中的 Deblending 过程是为了处理星场中由于视场匹配或自然原因(密近双星;密集星场,例如星团和低银纬天区等)带来的多目标能量分布叠加的问题,Clearing 过程是为了剔除 Deblending 过程中某些情况下(如初始阈值较低时具有浅轮廓的目标如椭圆星系)检测出的虚假目标<sup>[11]</sup>。这两个过程耗时较多,在整个算法中时间占比较大<sup>[12]</sup>。

对于小行星图像,一般较少出现恒星混叠现象,在天文定位时,若视场内参考恒星足够,则可以不选取叠加恒星进行模型拟合,只需从图像中检测出小行星和若干恒星用于天文定位。因此,为了提高处理效率,对原 SExtractor 进行简化。省去 Deblending 和 Clearing 过程;在阈值选取时,采用方差图像作为阈值,替代原算法中阈值的多次迭代,仅进行一次判断。简化后的目标提取算法在整个算法中的时间占比降低至 34%(文献[12]中 SExtractor 串行算法处理 4K×4K 图像时,提取+Deblending 过程+Clearing 过程的时间占比为 82%)。

目标提取并行化遵循的原则如下原则:

(1)剔除小于阈值的像素,只记录满足阈值要求的数据,由于背景像素个数远远大于目标像素个数,这一措施大大减少了数据量;

(2)只对满足阈值的像素进行索引,进行并行化的区域连通计算;

(3)根据标记,对索引进行排序,得到连通的段,根据连通段所占像素个数是否满足要求,剔除不满足要求的连通段。

简化后的目标提取算法的计算量和并行度如表 2 所示(4K×4K 图像),最高并行量可达满足阈值的像素级,程序实际运行时的并行度受 GPU 核数、内存分配及资源调度等限制。

表 2 4K×4K 图像目标提取部分计算量和并行度

Tab. 2 Computation and parallelism of 4K×4K image Object extraction

函数功能	计算量(G次)	并行度
目标连通	1.229 0	满足阈值的像素级并行
提取目标	0.228 7	目标级并行
基本信息计算	0.122 2	目标级并行

本文的目标提取算法针对小行星图像的特点,对 SExtractor 算法经过裁剪和优化。为了分析简化后精度的变化情况,将本文并行化质心提取结果与 CPU 下串行 SExtractor 算法(包含 Deblending 和 Clean 全过程)的质心提取结果进行对比。如表 3 所示,本文并行目标质心提取结果与串行 SExtractor 算法质心提取结果相差小于 1/10 像元,满足小行星地基光学观测天文定位的精度要求。

表 3 质心提取误差

Tab. 3 Error of centroid extraction

图像 序号	恒星 数量	质心 $x$ 坐标误差 $3\sigma/\text{pixel}$	质心 $y$ 坐标误差 $3\sigma/\text{pixel}$
1	1 600	0.06	0.08
2	1 630	0.08	0.09
3	1 000	0.08	0.08

## 4 匹配算法选取和优化

匹配算法通过对图像中提取的恒星与标准星表中的恒星进行匹配,证认恒星,确认靶面坐标系和天球坐标系之间的转换关系。

### 4.1 匹配算法的选取

匹配算法所需处理的数据量相对较小,算法一般迭代较多,因而,匹配算法在 CPU 下实现。现有应用较多的匹配软件有 Astrometry.net<sup>[13]</sup>和 Visual Pinpoint<sup>[14]</sup>等。Astrometry.net 离线匹配耗时较多,Visual Pinpoint 需要专门接口进行对接,这两款软件均提供 API,但无法对内部函数进行修改。因此选取开源的 Match 算法<sup>[15]</sup>。Match 算法是基于三角形匹配的匹配算法,算法流程如图 4 蓝色部分所示(彩图见期刊电子版),在图像提取的恒星中选取亮星构建图像三角形集合;依据指向信息和视场大小在星表中搜索恒星,选取亮星构建星表三角形集合;在两个集合之间依据最小阈值寻找相似三角形集合;对相似三角形集合中的顶点进行出现次数的投票;投票率高的点为匹配上的点,利用这些匹配上的点,计算转换关系。

### 4.2 匹配算法的优化

在测试过程中发现,在图像中恒星较多时,匹配成功率高。但是,当视场内恒星数量较少时,Match 算法匹配失败率较高。表 4 为一幅匹配失败的图像(视场  $0.18^\circ \times 0.18^\circ$ ,恒星数目为 17 颗(信噪比  $>5$ ))处理过程中的投票结果。经过分析发现,投票率高的 4 号和 7 号匹配对是错误的匹配对。Match 算法经过投票后只选择一次备选目标,这两对错误的匹配对会被选中,参与初始转换关系的计算,从而引起计算结果出错。

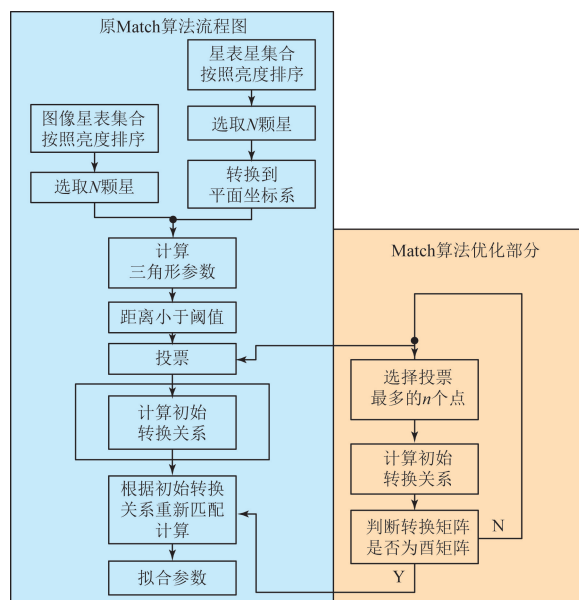


图 4 优化后的 Match 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of optimized Match algorithm

原 Match 算法是基于三角形匹配的匹配算法,匹配三角形的选取阈值和三角形边长比相关。视场内恒星数目较少时,出现大三角形(边长较长的三角形)的概率较高,而大三角形对阈值不敏感,且原 Match 算法投票后只进行一次备选目标选择,错误的匹配三角形很容易被选中,从而导致匹配失败。为了解决稀疏星场匹配失败的问题,尝试通过以下两种方式提高初始转换关系的准确性:(1)提高相似三角形选取阈值和投票选取阈值;(2)对转换关系的正确性进行判断和迭代。由表 4 可见错误的匹配对投票数仍然较高,通过提高投票选取阈值无法将其排除。且经过测试发现,三角形选取阈值提高后,参与投票的星变少,但仍然会引入错误匹配对。

表 4 投票结果

Tab. 4 Vote results

序号	图像星 序号	星表星 序号	投票 数	证认星序号 (在星表集合)	是否 匹配对
1	1	1	47	1	是
2	9	7	45	7	是
3	2	3	44	3	是
4	14	14	44	/	否
5	5	5	43	5	是
6	0	0	42	0	是
7	11	12	42	14	否
8	3	2	41	2	是
9	4	4	41	4	是
10	8	8	39	8	是
11	6	6	38	6	是
12	7	9	38	9	是

注:上表中“/”表示未在星表集合中找到证认星。

靶面坐标系和星表平面坐标系之间的关系符合方程(1),  $(x, y)$  为靶面坐标系下图像中星的坐标,  $(\mu, \sigma)$  为平面坐标系下星表恒星的坐标。Cdelt 为探测器象元比例尺,  $\theta$  为探测器旋转角。转换矩阵是一个酉矩阵:

$$\begin{bmatrix} u \\ \sigma \end{bmatrix} = Cdelt \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在 Match 算法的基础上增加初始转换关系的判断和迭代过程,流程图如图 4 黄色部分所示(彩图见期刊电子版)。选取投票率高的前  $m$  颗星作为计算子集,每次选取  $n$  颗星( $n < m$ ) 进行计算,这样就有种  $C_m^n$  组合,在这些组合中存在至少 1 种组合是正确的。通过判断转换系数构成的矩阵是否是酉矩阵来确定结果是否正确,如果非酉矩阵则重新选取  $n$  颗星进行计算。迭代多次直至计算结果是酉矩阵。优化后的 Match 算法,适用于稀疏星场的恒星证认,同时也确保非稀疏星场的恒星证认。

## 5 小行星检测

小行星的观测根据观测目的的不同主要有两种观测模式:跟踪模式和凝视模式。采用跟踪模式时,小行星呈点像,恒星呈拖长像;采用凝视模式时,恒星呈点像,小行星呈拖长像(见图 5)。无论是采用那种观测模式,小行星和恒星的视运动速度不同,可以通过监测连续多帧图像( $>3$ ) 提取出目标(恒星和小行星)的位置变化来检测小行星。具体流程如图 6 所示。

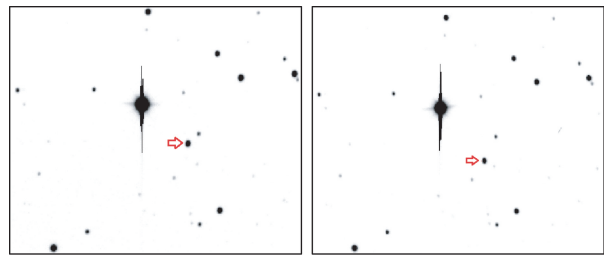


图 5 凝视模式下小行星在图像中的移动

Fig. 5 Asteroid motion at staring mode

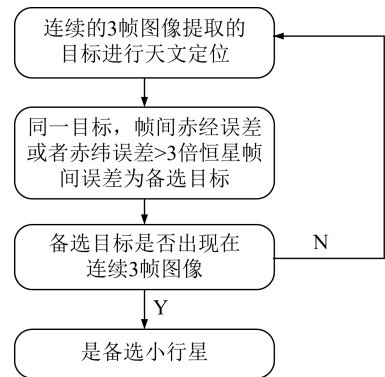


图 6 小行星检测流程图

Fig. 6 Flow chart of detecting candidate asteroid

## 6 测量实验与结果

测量实验所用图像为新疆天文台南山观测站 1 m 大视场光学望远镜(简称南山 1 m 望远镜)采集的小行星图像,南山 1 m 望远镜的 CCD 探测器像元数为  $4\ 160 \times 4\ 136$ , 视场为  $1.3^\circ \times 1.3^\circ$ [16]。图像曝光时间为 180 s, 数据处理 S/N 阈值设置为 3, 提取目标总个数为 5 000 个。所搭建实验测试环境如下: CPU 为 i7-6700, 计算机内存大小 8 GB, 系统为 64 bit 操作系统; GPU 型号为

NVIDIA GeForce GTX 2080Ti,核数 4 352,带宽 616 GB/s,显存 11 GB,开发环境为 CUDA10.0,系统为 64 bit 操作系统。如表 5 所示为 GPU 下和 CPU 下同一帧图像 100 次处理耗时的平均值,测试结果表明基于 GPU 的并行算法相比于 CPU 串行算法,速度提升了约 17 倍。

对 2016 年 4 月 27 日观测的 9713 小行星进行定位,定位结果和 IAU MPC (Minor Planet Center, MPC) 发布的精密星历对比(如表 6 所

示),精度优于 2"。

表 5 数据处理算法提速比

Tab. 5 Speedup ratio of data reduction

项目	CPU 耗时/ms	GPU 耗时/ms	提速比
背景拟合	1 859.23	100.16	18
目标提取	975.72	65.08	15
总计	2 834.95	165.24	17

表 6 9713 小行星 2016 年 4 月 27 日观测数据定位与 MPC 精密星历

Tab. 6 Astrometry of Asteroid 9713 data and MPC precision ephemeris on 27 April 2016

曝光开始时刻	曝光时间/s	定位 RA/(°)	定位 DEC/(°)	MPC RA/(°)	MPC DEC/(°)	赤经误差/(")	赤纬误差/(")
18:26:24.07	180	223.600 0	-11.265 1	223.600 0	-11.265 3	0.0	-0.7
18:59:15.81	180	223.594 5	-11.263 5	223.594 2	-11.263 9	1.3	-1.4
19:32:10.95	180	223.589 0	-11.262 1	223.588 8	-11.262 5	0.8	-1.5
20:05:29.68	180	223.583 4	-11.260 6	223.583 3	-11.260 8	0.2	-1.0
20:38:23.34	180	223.577 9	-11.259 1	223.577 9	-11.259 4	0.1	-1.2
21:11:15.05	180	223.572 3	-11.257 6	223.572 1	-11.258 1	1.0	-1.6
21:44:06.12	180	223.566 8	-11.256 1	223.566 7	-11.256 4	0.5	-0.9

## 7 结 论

为了提升小行星地基光学观测数据处理的速度,满足大口径大视场小行星地基光学望远镜数据处理实时性的要求,本文根据小行星数据处理的特点,对目标提取算法进行优化和并行化,使其可以在 GPU 平台上实现软硬件结合的加速;对 Match 匹配算法进行优化,提升了匹配算法的准确性和适用性。基于 NVIDIA GeForce GTX 2080Ti 搭建实验平台,处理 4K×4K 图像时间小于 200 ms,相比于在 CPU(CPU 为 i7-6700,电脑内存大小 8 GB,系统为 64 bit 操作系统)下的处

理速度提升了约 17 倍,提高了小行星数据处理的效率,实现了基于 GPU 的小行星光学观测图像实时处理。目前,4K×4K 图像基于 GPU 的数据处理,对 NVIDIA GeForce GTX 2080Ti 显卡的显存和核数的利用仍有冗余,该数据处理方法对于大靶面的图像,更能发挥 GPU 众核提速的优势。本方法也适用于其他光学巡天观测图像处理。但本方法中对混叠目标未进行特别处理,在两个目标混叠严重时,无法区分,未来将在混叠目标的区分算法上进行研究,进一步提升算法的适用范围。

**致 谢:** 本文感谢新疆天文台南山 1 m 望远镜全体工作人员的支持。

## 参考文献:

- [1] 李春来,刘建军,严韦,等.小行星探测科学目标进展与展望[J].深空探测学报,2019,6(5):424-436.  
LI CH L, LIU J J, YAN W, et al.. Overview of scientific objectives for minor planets exploration

- [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6 (5):424-436. (in Chinese)  
[2] 张荣桥,黄江川,赫荣伟,等.小行星探测发展综述[J].深空探测学报,2019,6(5):417-423.  
ZHANG R Q, HUANG J CH, HE R W, et al.. The development overview of asteroid exploration

- [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5):417-423. (in Chinese)
- [3] <http://www.lpl.arizona.edu/css>.
- [4] TONRY J L. An early warning system for asteroid Impact [J]. *The Astronomical Society of the Pacific*, 2011, 123(899):58-73.
- [5] TONRY J L, DENNEAU L, HEINZE A N, et al.. A High-cadence all-sky survey system [J]. *The Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130(988).
- [6] KAISER N, PAN-STARRS T. The Pan-STARRS survey telescope project[C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2007.
- [7] JESSICA D R, HERBERT E M V, JACOB V, et al.. SST asteroid search performance 2014—2017 [C]. 2018 *IEEE Aerospace Conference*; 2018, 1-8.
- [8] <https://www.weizmann.ac.il/physics/ofek/>.
- [9] LEHNER M J, WANG S Y, REYES-RUIZ M, et al.. The trans-neptunian automated occultation survey (TAOS II) [C]. *EPSC-DPS Joint Meeting*; 2019, 339, 193-196.
- [10] 卢晓猛, 王建峰, 毛永娜, 等. 4179 号小行星地基光学观测的天文定位研究统[J]. *中国科学: 科学技术*, 2013, 43(6): 614-617.  
LU X M, WANG J F, MAO Y N, et al.. The astrometry research system of ground-based optical observation of 4179 asteroid [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2013, 43(6): 614-617. (in Chinese)
- [11] BERTIN E, ARNOUITS S. SExtractor: software for source extraction [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1996, 117, 393-404.
- [12] ZHAO B, LUO Q, WU C. Parallelizing astronomical source extraction on the GPU [C]. 2013 *IEEE 9th International Conference on e-Science*; 2013, 88-97.
- [13] <http://nova.astrometry.net/>.
- [14] <http://pinpoint.dc3.com/>.
- [15] FRANCISCO G V, LUIS E C, JUAN D V et al.. FOCAS automatic catalog matching algorithms [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1995, 107, 1119-1128.
- [16] MA SH G, ESAMDIN A, MA L, et al.. A pre-cursive study of the time-domain survey of the Galactic Anti-center using the Nanshan 1-meter telescope with variable stars detected. *Astrophysics and Space Science*, 2018, 363: 68.
- [17] 魏楚亮, 陈儒林, 高谦, 等. 基于高层次融合的卷积神经网络 FPGA 硬件加速[J]. *光学 精密工程*, 2020, 28(5):1212-1219.  
WEI CH L, CHEN R L, GAO Q, et al.. FPGA-based hardware acceleration for CNNs developed using high-Level synthesis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(5):1212-1219. (in Chinese)
- [18] 宿德志, 王玉良, 吴世永, 等. 基于相似三角形的星图识别 [J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(11): 2467-2473.  
SU D ZH, WANG Y L, WU SH Y, et al.. Star identification algorithm based on similar triangle principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11):2467-2473. (in Chinese)
- [19] 王向军, 张继龙, 阴雷. 光流法运动估计在 FPGA 上的实现与性能分析[J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(1): 211-220.  
WANG XI J, ZHANG J L, YIN L. Implementation and performance analysis of optical flow based motion estimation on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1):211-220. (in Chinese)

## 作者简介:



兀 颖(1987—),女,陕西蓝田人,硕士,工程师,2013 年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事天文望远镜控制和数据处理方面的研究。E-mail: wuying@nao.cas.cn

## 通讯作者:



姜晓军(1970—),男,天津人,博士,研究员,2001 年于中国科学院北京天文台获得天体物理专业博士学位,主要从事恒星物理和天文技术与方法的研究。E-mail: xjjiang@nao.cas.cn