

并行图像配准算法在幸运成像中的应用

张楠, 李振伟, 杨文波

(中国科学院 国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117)

摘要:借助图形处理器(GPU)在通用计算领域的优势,解决图像配准面临的处理速度问题。研究了基于 GPU 加速处理图像配准的算法;根据 Fourier-Mellin 变换的图像配准算法原理,提出相应的 GPU 并行设计模型;利用计算统一设备架构的软硬件体系架构,实现 Fourier-Mellin 变换算法向 GPU 的移植。实验表明,运用所提出的并行方案完成分辨率 1024×1024 像素的图像配准耗时 22 ms,有效提升了图像配准效率,增强了幸运成像技术工程应用的可能性。

关键词:幸运成像;图像配准;Fourier-Mellin 变换;图形处理器;计算统一设备架构

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)04-0049-06

Application of Parallel Image Registration Algorithm in Lucky Imaging

Zhang Nan, Li Zhenwei, Yang Wenbo

(Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract: Taking advantage of the computing power of graphic processing unit (GPU) in general purpose computation, this paper studied the accelerated image registration algorithm based on GPU to solve the processing speed problem of image registration. Based on the image registration principle of Fourier-Mellin transform, a parallel registration algorithm model based on GPU was proposed. By employing the software and hardware architecture of compute unified device architecture (CUDA), the transplant of Fourier-Mellin onto GPU was finally achieved. The experimental results show that it takes about 22 ms for the proposed parallel computing algorithm to register images with the resolution of 1024×1024 pixels, effectively enhancing the efficiency of image registration and the possibility of its application in lucky imaging engineering.

Key words: lucky imaging; image registration; Fourier-Mellin transform (FMT); graphic processing unit (GPU); compute unified device architecture (CUDA)

利用地基光电望远镜对目标进行观测时,由于大气湍流的存在,地基望远镜的分辨率和成像质量受到很大限制。幸运成像技术是一种用于减小大气湍流影响的事后图像处理技术,具有结构简单、成本低和算法简单稳定的优势,能够有效降低大气湍流的影响,提高地基望远镜的分辨率,在空间目标探测与天文目标观测领域有着良好的应用前景^[1-2]。

幸运成像技术利用目标短曝光图像,通过评价选取、配准、叠加来获得高分辨率图像的原理,决定了该技术不可能做到完全实时。处理流程中的图像配准是幸运成像处理中最核心的一步,图像配准的精度直接关系到最终图像的质量,运算量约占整个运算的 60%~80%。而空间图像的分辨率一般在 1024×1024 像素甚至更高,即使采用快速傅里叶变换也要进行大量的计算,影响了空间图像配准的实时性,难以满足实时应

收稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11403064)

作者简介: 张楠(1984—),女,辽宁锦州人,助理研究员,博士,主要从事图像恢复方面的研究. E-mail: zhangn599@163.com

用需求^[3-4]。

近年来,随着 GPU(graphics processing unit,图形处理器)软硬件技术的日益成熟,GPU 已经具有强大的浮点计算和并行处理能力。目前,主流 GPU 的浮点运算能力已超过主流 CPU 的 10 倍,基于 GPU 的通用计算也日益得到人们的重视。特别是 NVIDIA 公司的 CUDA(compute unified device architecture,计算统一设备架构)技术的发布,使 GPU 程序开发更为高效灵活,将 GPU 应用推到一个新的高度^[5]。

因此,利用 GPU 的强大并行处理能力来实现高性能的图像配准算法是一种非常好的选择。研究基于 GPU 的并行图像配准算法并应用到幸运成像技术中,可以促进幸运成像技术向实时方向发展。

本研究针对幸运成像技术面临的处理速度问题,结合 GPU 的软硬件特性,提出一种 CPU+GPU 异构模式下的图像配准方法,对 Fourier-Mellin 变换(Fourier-Mellin transform,FMT)算法加以并行改造,使用 GPU 加速处理图像配准算法,协同 CPU 完成 Fourier-Mellin 变换运算,充分利用 GPU 的并行计算能力,使 Fourier-Mellin 图像配准算法性能得到大幅度提高。

1 Fourier-Mellin 图像配准算法基本原理

目前常用的图像配准方法主要为基于特征、基于图像灰度信息和基于变换域的图像配准法等^[6-7]。基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准算法是从基于傅里叶变换的配准算法发展起来的,主要利用傅里叶变换的位移理论和相似性,对照明变化和部分遮挡具有很强的鲁棒性,并可以抑制一定的加性噪声,具有像素级配准精度^[8]。

1.1 相位相关理论

相位相关法是 FMT 的基础,设图像 $f_2(x, y)$ 是图像 $f_1(x, y)$ 在水平和垂直方向分别平移 x_0, y_0 得到的,两者关系为:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

分别对 f_1, f_2 进行傅里叶变换,根据傅里叶变换的位移不变特性,可得到:

$$F_2(f_x, f_y) = F_1(f_x, f_y) e^{-j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)} \quad (2)$$

计算两幅图像的互功率谱,得到相位相关函数:

$$C(f_x, f_y) = \frac{F_1^*(f_x, f_y) F_2(f_x, f_y)}{|F_1^*(f_x, f_y) F_2(f_x, f_y)|} = e^{-j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)} \quad (3)$$

对式(3)进行傅里叶逆变换可得到一个位于点 (x_0, y_0) 的冲激函数,其峰值点对应的坐标即为要求解的 $f_2(x, y)$ 相对 $f_1(x, y)$ 的平移量 (x_0, y_0) 。

1.2 FMT 算法

设待配准图像 $f_2(x, y)$ 是由原始图像 $f_1(x, y)$ 经过平移、旋转和一致缩放变换得到的,则两者关系为:

$$f_2(x, y) = f_1[s(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - x_0, s(-x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0) - y_0] \quad (4)$$

其中: θ_0 为旋转角度, s 为缩放因子, (x_0, y_0) 为水平和垂直方向的平移量。

相应的图像频谱满足:

$$|F_2(f_x, f_y)| = s^{-2} |F_1[s^{-1}(f_x \cos \theta_0 + f_y \sin \theta_0), s^{-1}(-f_x \sin \theta_0 + f_y \cos \theta_0)]| \quad (5)$$

式(5)说明频谱幅度是平移不变量,仅与旋转角度 θ_0 和缩放因子 s 有关,而与平移量 (x_0, y_0) 无关,因此可以根据图像的频谱幅度求出 θ_0 和 s ,将其与 (x_0, y_0) 分离计算。

引入极坐标变换:

$$\begin{cases} f_x = \rho \cos \theta \\ f_y = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)可得:

$$f_{2p}(\rho, \theta) = s^{-2} f_{1p}(\rho/s, \theta - \theta_0) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,旋转变换转化为极坐标下的极角线性变化,继续对式(7)作对数变换可得:

$$f_{2pl}(\rho, \theta) = s^{-2} f_{1pl}(\lambda - \eta, \theta - \theta_0) \quad (8)$$

其中: $\lambda = \lg \rho, \eta = \lg s$ 。

从极坐标转换到对数-极坐标的过程称作 Fourier-Mellin 变换。式(8)表明,目标图像在空域的旋转和缩放变换转化为对数-极坐标域中相应参数的平移变换,而图像的平移在对数-极坐标域没有任何影响。进而利用相位相关理论求得旋转角度 θ_0 和缩放因子 s ,即可对图像 $f_2(x,y)$ 进行 $-\theta_0$ 旋转和 $1/s$ 缩放变换后,再次应用相位相关法即可求得平移量 (x_0, y_0) ,最终将图像 $f_2(x,y)$ 变换到图像 $f_1(x,y)$ 的坐标系下。图像配准过程如图 1 所示。

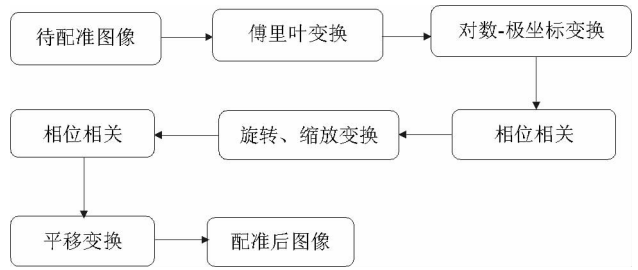


图 1 基于 FMT 的图像配准流程

Fig. 1 Registration procedure based on FMT

2 基于 GPU 的 FMT 图像配准

2.1 CUDA 编程模型

CUDA 是针对 GPU 通用计算的一个并行计算架构,CUDA 编程模型在设计结构上采用了异构编程的模式,即基于 CPU+GPU 的协作处理:CPU 负责逻辑运算,GPU 负责计算密集型任务的处理。在 GPU 上执行的程序被称为内核(kernel),在 CUDA 的 SIMT 模型中,一次 kernel 调用由 N 个线程并行执行 N 次。CUDA 线程被组织为“grid(网格)-block(线程块)-thread(线程)”的层次结构^[9],如图 2 所示。

CUDA 模型的大致计算流程如下:主程序由 CPU 控制,当某个 kernel 需要被执行时,CPU 首先将需要处理的数据从内存复制到显存中;然后 CPU 向 GPU 发送程序指令;GPU 对显存中的数据执行相关指令,再把计算结果复制到内存中,交由 CPU 继续完成后续处理^[10]。

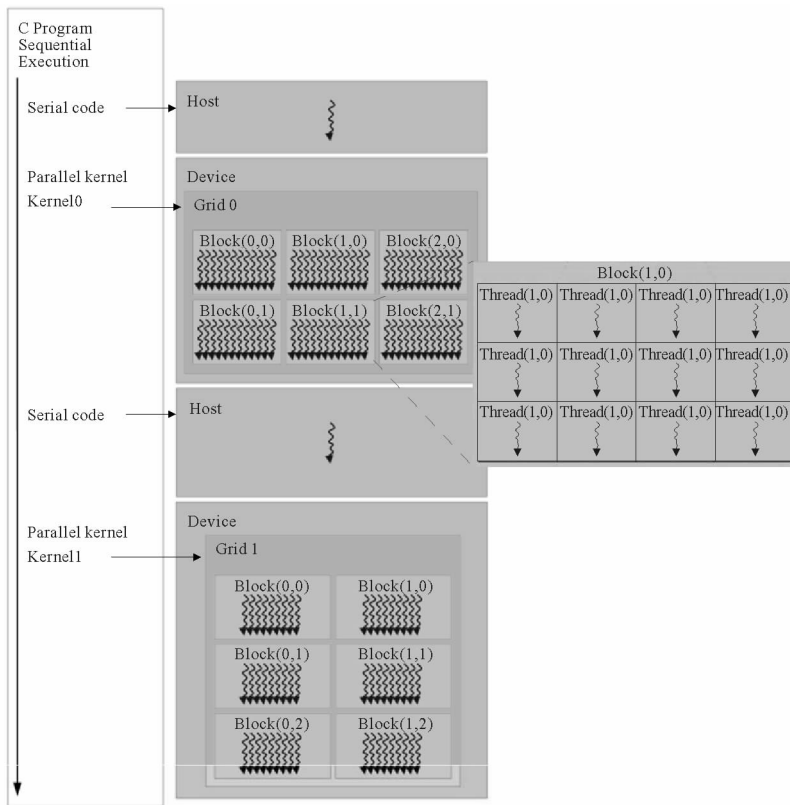


图 2 CUDA 编程模型

Fig. 2 CUDA programming model

2.2 基于 GPU 的 FMT 算法

CPU 中实现的算法并不能直接移植到 GPU 平台执行,必须结合 CUDA 编程模型,对原有的 FMT 串行算法进行分析,把算法改造成符合 GPU 架构的并行算法,才能够充分利用 GPU 并行计算能力。

FMT 图像配准算法主要包含了傅里叶变换、坐标变换和几何变换三种类型的计算。傅里叶变换本身具有很好的分治特性,符合 GPU 计算特点,并且 NVIDIA 公司提供了快速傅里叶变换库函数;而坐标变换和几何变换属于顺序无关点处理计算,非常符合 CUDA 编程模型。这些特点为 FMT 在 GPU 上进行并行改造带来了可能性。

图 3 所示为 FMT 图像配准的 GPU 实现主要流程以及 CPU 端和 GPU 端的任务划分。

具体实现时,对各运算环节分别设计不同的 kernel 函数,GPU 启动 kernel 执行运算,各个线程并行处理各自对应的图像像素。一般保证线程与像素一一对应,可采用方块式划分方法,如图 4 所示:grid 根据图像分辨率划分为 block,block 包含若干 thread,每个 thread 负责一个像素的计算,通过线程 ID 索引像素点在图像中的位置。

傅里叶变换部分的计算选用 NVIDIA 公司开发的 CUFFT 程序库,该库是一个基于 GPU 的快速傅里叶变换函数库,有着与 CPU 上广泛使用的 FFTW 函数库相似的接口,为在频率域处理图像提供了很大的方便。

3 实验结果与分析

采用 CPU+GPU 混合架构作为硬件实验平台,其中 GPU 为 NVIDIA Geforce 605,时钟频率 1.05 GHz,512 MB RAM;CPU 为 Intel Core i3-2120,主频 3.3 GHz,2 GB 内存。编译环境为 Visual Studio 2008,CUDA 4.2。

为了验证算法的性能,以两组实验图像为例进行分析。其中,实验 1 的原始图像来自室内采集的 3 号分辨率板图像,分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 像素;实验 2 的原始图像来自某 1.23 m 望远镜采集月表图像,分辨率为 768×576 像素。

3.1 分辨率板成像实验

将 3 号分辨率板图像作为参考图像 $r(x,y)$,如图 5(a)所示。对 $r(x,y)$ 进行向上 12 个像素和向右 6 个像素的平移,并作 10° 的逆时针旋转得到待配准图像 $s(x,y)$,如图 5(b)所示。

利用相位相关性分别在对数-极坐标域和空域中求出旋转角度 ($\theta = 9.875^\circ$) 和平移系数 ($\Delta x = 6, \Delta y = -12$)。图 5(c)、(d) 给出了配准后的图像和叠加后的图像,从图 5(d) 中可以看出,线对和数字都能完全重

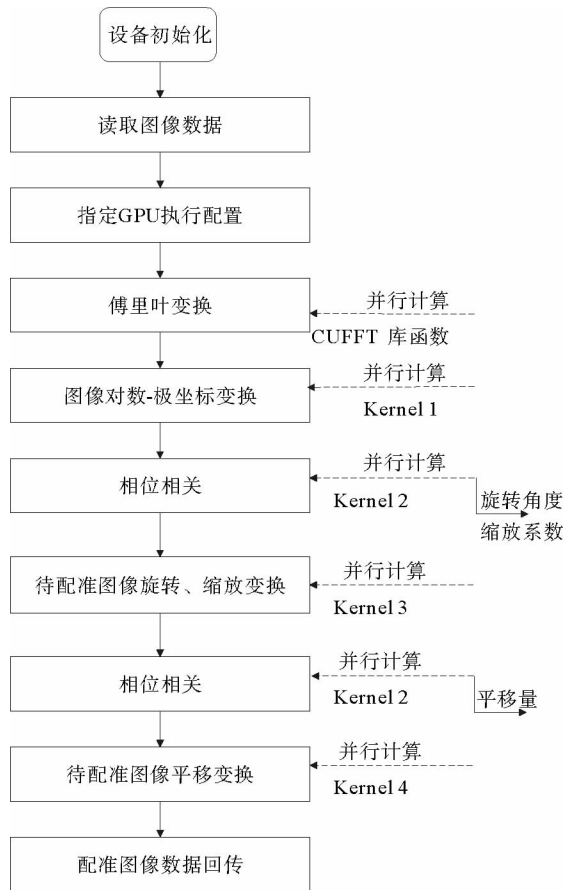


图 3 基于 GPU 的 FMT 算法的基本模块与流程
Fig. 3 Modules and flow of FMT based on GPU

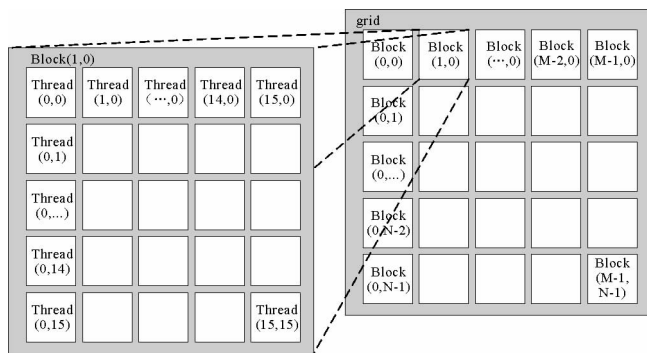


图 4 线程块划分方案
Fig. 4 Division of blocks

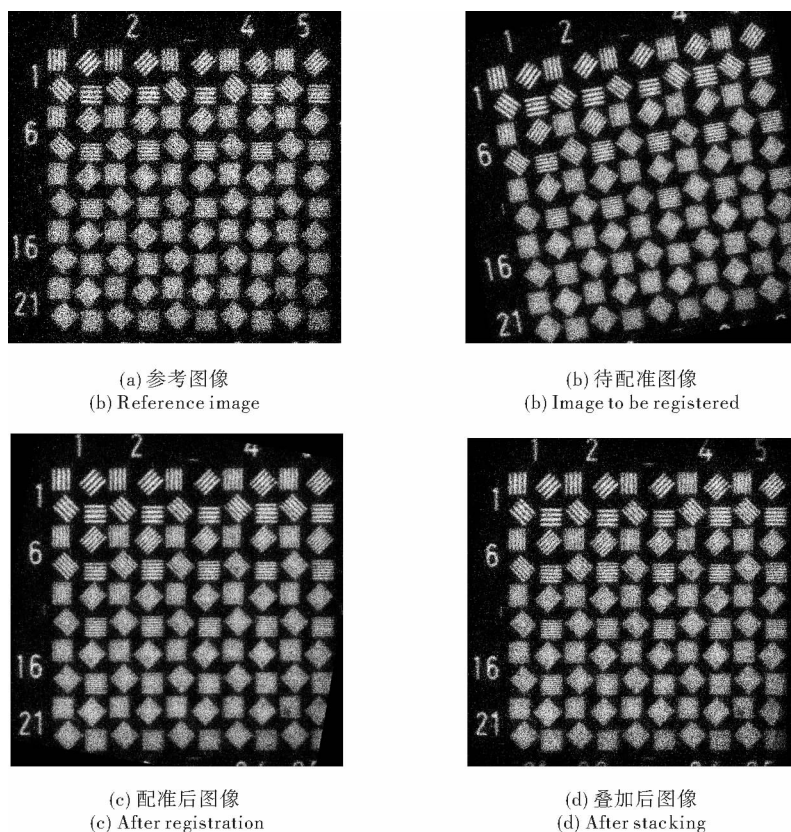


图 5 分辨率板图像及配准后的图像

Fig. 5 Original image and registered image

合,没有明显的叠加痕迹。图像质量定量评价结果如表 1 所示。

目前 GPU 浮点运算与常规的 CPU 浮点运算存在极小的误差,因此 CPU 与 GPU 的配准结果是基本一致的。CPU 串行算法耗时 1 063 ms,而 GPU 并行算法耗时 22 ms,获得了约 48 倍的加速比。

3.2 月表成像实验

图 6 为月表某处图像配准效果。由于单帧图像很难展示配准的结果,将配准后的图像进行叠加,由图 6(b)可以看出,月表图像经配准叠加后,具有更加丰富的细节,原始图像中很多轮廓模糊的小环形山都可以在配准叠加后的图中清晰显示。利用 Fisher 信息量(Fisher information, FI)对图像质量进行定量评价,根据计算结果,配准前图像 6(a)的 FI 值为 0.003 2,配准叠加后图 6(b)

表 1 图像质量评价

Tab. 1 Evaluation of image equality

图像	MSE	PSNR
待配准图像	80.86	29.05
配准后图像	55.28	32.70

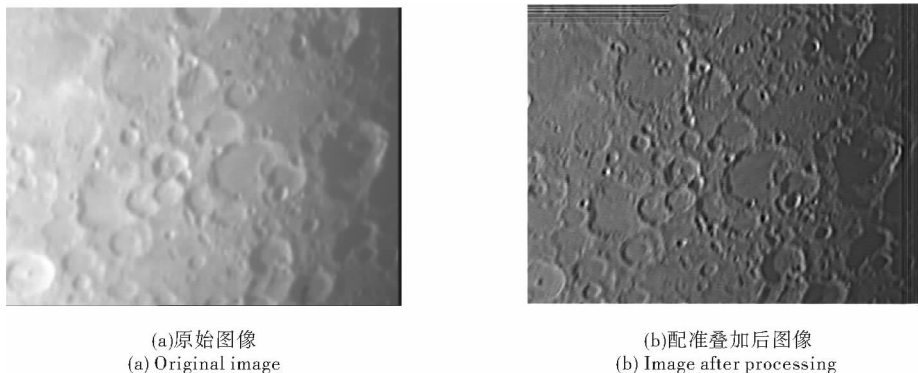


图 6 月表图像配准

Fig. 6 Image registration of moon surface

的 FI 值为 0.007 3,为配准前的 2 倍多。

4 结束语

立足于解决幸运成像系统中图像的实时配准问题,实现了一种基于 GPU 的并行 FMT 图像配准算法。实验结果表明,利用 CUDA 软硬件架构,在保证配准效果不变的前提下,基于 GPU 的并行优化程序在配准精度方面达到了要求,对 $1\,024 \times 1\,024$ 像素图像的配准时间为 22 ms,能够满足实时应用的需求,具有较强的工程应用价值,对幸运成像技术向实时方向发展是非常有意义的。

参考文献:

- [1]Law N M, Mackay C D, Baldwin J E. Lucky imaging: High angular resolution imaging in the visible from the ground[J]. *Astronomy and Astrophysics Review*, 2006, 446: 739-745.
- [2]杨忠良,李均盛,杨卫军. 应用幸运成像技术的宽视场自然目标高分辨率成像[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1821-1825.
Yang Zhongliang, Li Junsheng, Yang Weijun. High-resolution wide-area imaging natural targets with lucky imaging technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1821-1825.
- [3]赵金宇,张世学,王斌. 使用幸运成像技术恢复地基大口径望远镜图像[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1396-1400.
Zhao Jinyu, Zhang Shixue, Wang Bin. Restoration of astronomical images using lucky imaging technique on ground-based large telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1396-1400.
- [4]黄成满. 基于 CUDA 并行计算的无人机遥感图像快速拼接[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 37-44.
- [5]Hotball. 深入浅出谈 CUDA[EB/OL]. [2015-02-28]. <http://www.kimicat.com/cuda/%E7%B0%A1%E4%BB%8B>
- [6]焦继超,赵保军,周刚. 一种傅里叶-梅林变换空间图像快速配准算法[J]. *兵工学报*, 2010, 31(12): 1551-1556.
Jiao Jichao, Zhao Baojun, Zhou Gang. A fast registration algorithm based on Fourier-Mellin transform for space image[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(12): 1551-1556.
- [7]张叶,曲宏松,李桂菊,等. 采用 FMT 的实时景象匹配关键技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1576-1580.
Zhang Ye, Qu Hongsong, Li Guiju, et al. Key technique of real-time scene matching system based on FMT[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1576-1580.
- [8]Srinivasa R B, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [9]NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA C Programming Guide, Version 4. 2 [R/OL]. [2012-04-05][2015-02-28] <http://www.developer.download.nvidia.com/compute/cuda/4-2/toolkit/docs>.
- [10]张楠. 基于相位差异的地基望远镜图像恢复算法与 GPU 高速实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 51-58.

(责任编辑:吕文红)