一种全共享低交换并行高分辨太阳图像重建方法

刘鹏翔¹, 季凯帆², 邓辉¹, 梅盈², 柳翠寅¹, 卫守林^{1,2}, 戴伟^{1,2}, 王锋^{1,2*}

1. 昆明理工大学云南省计算机技术应用重点实验室, 昆明 650500;

2. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216

* 联系人, E-mail: cnwangfeng@gmail.com

2017-07-27 收稿, 2017-09-01 修回, 2017-09-01 接受, 2017-11-24 网络版发表

国家自然科学基金(U1531132, U1631129, 11403009, 11463003, 11573012, U1231205)和云南省应用基础研究项目资助

摘要 高分辨图像重建在太阳物理研究具有重要地位, 但长期面临着观测数据量巨大, 重建速度慢等难题, 严重影响了太阳高分辨观测的开展. 本文针对我国新一代太阳观测望远镜如一米新真空太阳望远镜(new vacuum solar telescope, NVST)、光学和近红外太阳爆发监测望远镜(optical and near-infrared solar eruption tracer, ONSET)的需求, 通过实测方式细致分析了重谱法各模块的计算耗时, 明确了数据交换性能是影响重建性能的关键瓶颈. 在此分析基础上, 提出了一种通用的全共享低交换并行高分辨图像重建方法. 此方法基于消息传递接口技术(message passing interface, MPI)和共享内存机制, 通过算法优化使重建计算进程完全利用共享内存来高速读写数据, 显著减少进程间数据交换数量, 降低通信开销. 实验结果表明, 本方法大幅度提高了重谱法和Knox-thompson法重建性能, 在单台16核PC服务器上, 重建100帧ONSET 1660×1660像素大小图像和100帧NVST 1024×1024像素大小图像分别仅需约12.4和5.6 s, 基本实现了实时高分辨重建的要求, 为后续科学研究打下了坚实的基础.

关键词 图像重建, 重谱法, 全共享, 低交换, 消息传递接口技术, 共享内存

现有的太阳物理研究发现, 太阳上很多基本活动现象, 如典型的光球亮点、色球埃勒曼炸弹的尺度都在1角秒以内. 太阳活动区的精细结构, 如光球半影纤维、本影亮点以及一些色球小尺度结构也都明显小于1角秒, 并且太阳上小尺度的活动现象和大尺度的现象被认为有着本质联系^[1]. 因此, 获取高空间分辨率的太阳数据是进一步研究太阳物理基本问题的必备条件. 由于地面大口径太阳望远镜受地球大气湍流的严重影响, 观测图像表现为偏移、模糊及几何变形等形态^[2]. 地基太阳高分辨观测普遍采用自适应光学技术和高分辨率图像重建技术, 其中自适应光学(AO)系统应用于许多先进的太阳望远镜以提高观测图像的空间分辨率^[3-5], 然而其也存在矫正视场有限和无法彻底矫正波前畸变的不足. 为了实现衍射

极限分辨率天文成像, 需要对海量的太阳观测图像进行高分辨重建.

为了准实时处理海量太阳观测数据以及应对巨大的太阳图像高分辨重建运算量, 国内外许多先进的地基太阳望远镜, 采用并行实现的斑点掩模^[6]重建算法进行高分辨图像重建, 并取得了很好的处理效果. 2008年, 美国NSO(National Solar Observatory)天文台的DST(Dun Solar Telescope)太阳望远镜, 在由23个计算节点组成的集群系统上, 使用斑点掩模算法和MPI并行编程模型, 由100帧1024×1024像素图像并行重建1帧1024×1024像素图像仅需23 s^[7]. 2010年, 美国BBSO天文台的NST太阳望远镜在由8个计算节点组成的集群系统上, 由100帧2024×2024像素图像并行重建1帧2024×2024像素图像仅需5~6 min^[8].

引用格式: 刘鹏翔, 季凯帆, 邓辉, 等. 一种全共享低交换并行高分辨太阳图像重建方法. 科学通报, 2018, 63: 181-188

Liu P X, Ji K F, Deng H, et al. A global-shared and low-exchange parallel method of high resolution solar image reconstruction (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 181-188, doi: 10.1360/N972017-00818

2014年,我国抚仙湖一米新真空太阳望远镜(new vacuum solar telescope, NVST),采用斑点掩模法在555个计算核心的集群上,由100帧2560×2160图像重建一帧2368×1920像素图像耗时约28 s^[9]. 2017年,中国科学院光电技术研究所的唐若林等人^[10],在一台12核的Linux服务器上,采用基于多核CPU实现的斑点图重建方法,由100帧斑点图重建一帧1280×1280像素图像耗时需31 s. 由此可见,随着并行计算技术和计算设备的发展,图像重建的效率有了很大程度的提高. 然而,随着太阳望远镜观测数据量的增加,以现有重建方法的处理效率,仍然难以满足太阳观测数据的处理需求,需要进一步提高太阳高分辨重建效率.

由于Knox-thompson法^[11](K-T法)和重谱法传统的并行实现方式一致,且重谱法的计算过程比K-T法更为复杂,因此本文中选择传统重谱法并行重建方法为研究对象. 我们详细分析了传统重谱法并行重建算法的实现方式,针对其重建过程中通信频繁且耗时量大的特点,提出并实现了一种全共享低交换的并行重谱高分辨图像重建方法. 此方法改进了数据交换方式,通过共享内存读写大幅减少重建过程中通信耗时开销. 在保证计算结果完全正确的前提下,显著提高了图像重建效率.

1 重谱法算法

重谱法^[1,12,13](斑点掩模或Level1+)图像重建算法,主要理论包含斑点干涉术和斑点掩模法两部分. 该重建方法是依据等晕区和望远镜自身的角分辨率大小,将一组太阳观测图像分割为对应大小的子块图像族^[1]. 各个子块图像族是相对独立的,均通过斑点干涉术重建目标傅里叶模,并采用斑点掩模法重建目标傅里叶相位,由重建出的子块图像傅里叶模和相位来重建子块图像,并将各个重建完的子块图像拼接成一帧完整的高分辨太阳图像^[13].

(i) 傅里叶模重建. 在重谱法图像重建算法中,采用斑点干涉术来重建目标傅里叶模,斑点干涉术方法如下式所示^[14]:

$$|O(f)|^2 = \frac{\langle |I_i(f)|^2 \rangle_i}{\langle |H_i(f)|^2 \rangle_i}, \quad (1)$$

其中, $\langle \cdot \rangle_i$ 表示用于重建子块图像时子块图像族中子图像的平均运算. $\langle |H_i(f)|^2 \rangle_i$ 为斑点干涉术传递函

数,可以通过谱比技术计算或实测得到. 目标功率谱 $|O(f)|^2$ 可通过子块图像的平均功率谱 $\langle |I_i(f)|^2 \rangle_i$ 计算得出,计算出功率谱 $|O(f)|^2$ 后,便可得到子块图像目标的傅里叶模.

(ii) 傅里叶相位重建. 重谱法图像重建算法中,使用斑点掩模法重建目标的傅里叶相位. 其重谱表达式如下^[15,16]:

$$B(u, v) = \langle I_i(u) I_i(v) I_i^*(u+v) \rangle_i \\ = O_i(u) O_i(v) O_i^*(u+v) g \langle H_i(u) H_i(v) H_i^*(u+v) \rangle_i, \quad (2)$$

其中, $\langle I_i(u) I_i(v) I_i^*(u+v) \rangle_i$ 为斑点图的平均重谱, $\langle H_i(u) H_i(v) H_i^*(u+v) \rangle_i$ 是重谱法的传递函数, $O_i(u) O_i(v) O_i^*(u+v)$ 为目标重谱. 通过上述方法求出目标重谱后,便可通过相位递推方式,获得目标的傅里叶相位^[17]. 由目标重谱递推目标相位,式(2)可以将目标重谱的相位表示为^[13]

$$\phi(u, v) = \phi(u) + \phi(v) - \beta(u, v), \quad (3)$$

其中, $\beta(u, v)$ 表示目标重谱的相位,根据上式从低频到高频递可依次推算出目标的全部相位. 其中,递推的初始相位可以是任意值,但一般以斑点图叠加平均后的相位值为递推初始相位.

2 传统并行实现方式分析

目前,已有多种重谱法并行实现方式^[1,7,18],如MPI, OpenMP, MPI+OpenMP和CUDA,其中应用较多的是基于MPI并行实现的重谱法图像重建算法. 下面对传统基于MPI实现的重谱法重建算法进行详细分析,其主要包含以下几个主要处理模块:斑点图数据读入、图像分块、子块图像二次对齐、子块图像相位和模的重建、所有子块图像拼接. 其运行流程如图1所示.

在这种并行处理方式中,主进程将待处理图像数据分割为一系列子块图像族后,依次向各个子进程分发一个子块图像族数据进行重建. 在“子块图像二次对齐”模块中,子进程需要将计算出的子块图像偏移量发送到主进程,由主进程依据子块图像偏移量重新分割该子块对应的图像数据,并分发给该子进程,以实现子块图像的精确对齐. 子进程重建完该子块图像后,将重建结果发送到主进程进行保存,主进程接收完该子块重建结果后,再向子进程发送一个新的子块图像重建任务. 以此任务调度策略对所有子块图像族进行重建计算,最后由主进程结合所有子块图像的重建结果,将子块重建图像进行对齐

图1 基于MPI实现的重谱法图像重建流程图

Figure 1 The flow chart of Triple-Spectral image reconstruction based on MPI

和拼接成一帧完整的高分辨图像。

由上述重建算法执行流程可知, 在每一个子块图像族的重建过程中, 子进程与主进程间都有多次通信和数据传输。在图像重建任务并行处理过程中, 频繁的通信和数据传输, 必定会加大任务处理过程中的通信耗时开销, 这可能会降低图像重建任务整体处理效率。为了对传统方法做进一步的效率分析, 我们选用ONSET^[19]和NVST的观测数据作为实验数据, 测试在不同规模集群环境下运行时, 分别由一组100帧图像重建一帧ONSET 1660×1660像素大小图像和一帧NVST 1024×1024像素大小图像, 子块图像重建过程中及各模块的耗时情况。其中ONSET子块图像大小为32×32, NVST子块图像大小为128×128。实验采用由6台高性能服务器组成的集群运行环境, 每个节点配置为Intel Xeon CPU E5-2630 v3 @ 2.40 GHz 16核CPU, 内存大小为128 G, 各计算节点之间

通过Infiniband FDR (56 Gb)网络进行通信。实验系统环境为Ubuntu14.04, 并行工具为OpenMPI2.0。实验测试数据见表1。

根据表1中实验数据可知, 采用传统方法处理ONSET和NVST观测数据时, 分别在单台服务器和集群环境下重建, 子块图像重建过程中计算部分耗时长变化不大, 而重建过程中通信耗时均占了很大的比例。在单台服务器下, 重建ONSET和NVST子块图像中通信耗时占比分别为78%和70%, 在集群环境下通信耗时占比分别高达96.7%和97.2%。对于高分辨太阳图像重建整个过程, 可将其大致分为子块图像重建和子块图像拼接两大部分, 其中子块图像重建过程主要是各子进程并行对各子块图像进行重建的过程, 待重建完所有子块图像后再拼接成单帧高分辨图像。通过实验数据可知, ONSET或NVST图像在不同运行环境下重建时, “子块图像拼接成单帧高

表1 在不同集群环境下,传统方法重建效率测试数据

Table 1 In different cluster environments, the reconstruction efficiency of test data using traditional method

模块	ONSET子块图像重建测试数据(ms)				NVST子块图像重建测试数据(ms)			
	单台服务器(16进程)		集群(96进程)		单台服务器(16进程)		集群(96进程)	
	耗时	占用时间比 (%)	耗时	占用时间比 (%)	耗时	占用时间比 (%)	耗时	占用时间比 (%)
接收子块图像数据	2	4.9	118	39.1	26	2.7	50	0.5
计算子块图像偏移量	2	4.9	3	1	55	5.7	54	0.5
子块图像二次对齐过程通信	13	31.7	145	48	346	36	5114	49.7
计算截取对齐后的子块图像数据	2	4.9	2	0.7	42	4.4	41	0.4
重建子块图像中目标的相位和模	5	12.2	5	1.6	191	19.9	191	1.9
将子块图像族重建结果发到主进程	17	41.4	29	9.6	301	31.3	4838	47
子块图像重建总耗时	41	—	302	—	961	—	10288	—
所有子块图像重建总耗时	28623	85.3	31543	86.6	14652	95.5	25069	97.4
子块图像拼接成单帧高分辨图像耗时	4925	14.7	4892	13.4	686	4.5	677	2.6
重建一帧图像总耗时	33.5 s	—	36.4 s	—	15.3 s	—	25.7 s	—

分辨图像耗时”部分的耗时时长基本一致. 由于实验中ONSET对应的子块的数量远大于NVST, 其在“子块图像拼接成单帧高分辨图像耗时”模块耗时明显大于NVST. 对比子块图像重建各模块耗时数据可知, 在重建过程中通信耗时开销远大于重建计算耗时开销, 且在集群环境中进行运行时, 因额外增加了大量的通信耗时开销, 采用集群的方式虽提高了任务并行处理率, 但并不一定能有效提高图像整体重建效率.

3 全共享低交换并行算法设计与实现

全共享低交换的并行重谱高分辨图像重建方法以重谱法作为图像重建核心算法, 采用进程间共享内存机制, 在主进程中执行开辟共享内存的操作, 依据待处理图像大小分别开辟对应的待处理图像数据存储共享内存和全部子块图像重建结果存储共享内存, 然后将共享内存映射到各进程, 这样使各进程均能访问共享内存. 各进程对待处理图像数据只进行只读操作, 且各子进程对于子块图像重建结果的存储, 是通过指针偏移的方式将数据存储到共享内存对应的位置, 即各子进程对子块重建结果是独立存储的, 有效地避免访问延迟和并发读写问题. 通过这种方法实现图像重建过程中的数据交换, 消除图像重建过程中大量的通信过程, 减少重建过程中的通信耗时开销, 从而提高图像重建效率. 其流程图如图2所示.

采用此方法由一组观测数据重建一帧高分辨图

像时, 主进程根据望远镜的观测角分辨率和等晕区大小(一般选取 $5'' \times 5''$), 将待处理图像分为 N 个子块图像族, 各子块的编号为0至 $N-1$, 然后根据用户所创建的进程总数 M 将子块重建任务平均分配到各个子进程. 由于进程总数 M 和子块图像族总数 N 均有一定可变性, 子块图像族总数 N 不一定能完全被子进程数 $M-1$ 整除, 这里我们采用相对平均的分配方式进行任务的分配. 通过取整计算 $N/(M-1)$ 的值为 n 余数为 s , 确定前 s 个子进程所分配的任务总数 t 的值为 $n+1$, 其他子进程分配的任务总数 t 得值为 n . 指定1号子进程所分配的子块重建任务起始编号为0, 然后依据各子进程所分配的子块重建任务总数 t , 可以计算出各子进程所分配的任务起始编号 k . 主进程只需将各子进程所分配的任务起始编号 k 和任务总数 t , 通过消息传到接口MPI发送到各子进程, 一次性完成所有子块重建任务的分发.

子进程在进行图像重建计算时, 需要将待处理图像数据存储共享内存和全部子块重建结果存储共享内存映射到本进程, 从而使各进程均能访问共享内存. 子进程由获取到的子块重建任务起始编号 k 和任务总数 t , 以循环的方式依次对每一个子块重建任务进行处理, 循环次数为所分配的任务总数 t . 子进程在对某一子块任务进程重建时, 依据子块任务的编号和待处理图像偏移量, 从待处理图像数据存储共享内存中读取对应的子块图像数据. 在子块图像二次对齐中, 通过计算出该子块中各帧图像间的偏

图2 算法流程图

Figure 2 The flow chart of algorithm

移量, 再依据偏移量从共享内存中重新读取该子块图像的数据进行重建. 在采用重谱法进行子块图像重建计算过程中, 均使用已映射到共享内存的变量参与计算, 将重建结果直接存储到共享内存中.

子进程完成一个子块重建任务后, 便循环到下一个子块任务进行重建. 当处理完该进程所属的所有子块重建任务后, 子进程发送一个true信息到主进程, 以确认该子进程已完成了 t 个子块图像的重建计算. 主进程收集到 $M-1$ 个子进程发送的true信息后, 从共享内存中读取所有子块重建结果数据, 并对齐拼接成一帧高分辨图像进行保存. 最后发送进程退出消息到各个子进程, 实现计算资源的释放和进程的退出, 从而完成了由一组观测数据重建为一帧高分辨图像的处理任务.

基于MPI和共享内存实现的全共享低交换的并行重谱高分辨图像重建方法, 充分利用了不同进程

均可以访问共享内存的特性, 很大程度减少重建过程中进程间的通信过程, 提高了进程间数据交换效率. 该算法具有明显的两个特点: (1) 待处理图像数据和重建结果数据全共享化. 在进行图像重建计算时, 将共享内存映射到各个进程, 各进程便可直接从共享内存中对应位置读取或存入相应的数据, 为减少进程间通信和数据交换提供了有利条件; (2) 减少进程间的通信和数据交换. 利用待处理图像数据和重建结果数据的全共享化, 我们分别从子块重建任务的分发、子块图像二次对齐和子块重建结果保存这3个部分减少了进程间的通信和数据交换. 待所有子块图像重建完后, 主进程可直接从共享内存中读取子块重建结果拼接成一帧完整的高分辨图像.

4 性能测试结果

为了测试全共享低交换的并行重谱高分辨图像

重建方法的实际重建效率,我们分别选用ONSET和NVST各两组不同像素大小的观察数据作为实验数据,在配置为Intel Xeon CPU E5-2630 v3 @ 2.40GHz 16核CPU,内存大小为128 G的一台高性能服务器上,采用此方法分别重建一帧1660×1660像素大小的ONSET图像和1024×1024像素大小的NVST图像.实验数据见表2所示.

由表2中重建过程的各模块耗时数据可以看出,重建过程中子块图像目标模和相位的计算耗时和子块图像拼接成单帧高分辨图像的耗时基本保持不变,“子块图像二次对齐过程通信”和“将子块图像族重建结果发到主进程”两个模块中通信耗时已完全消除,极大地缩减了子块图像的重建耗时.从“所有子块图像重建总耗时”数据可知,优化后很大程度减少了重建耗时,提高了子块图像的重建效率.需要说明的是,采用全共享低交换并行方法重建时,第一个模块的耗时为子进程从共享内存中截取子块图像数据耗时.通过重建一帧图像的总耗时来看,采用全共享低交换并行方法后,处理ONSET和NVST的子块图像重建效率有明显的提高.其重建结果如图3所示.

5 结论

在高分辨太阳观察研究领域中,观测数据的处理效率直接影响着太阳望远镜科学数据的产出.在早期快速高分辨太阳图像重建技术研究中,由于计算机性能及硬件配置的限制,鉴于采用K-T法或重谱法进行太阳图像重建的计算量大和分块重建的特点,

采用共享内存方式无法取得较好的重建效率.因此,早期一般采用在集群环境下并行处理的方式进行图像重建计算.随着计算机性能及配置的提升,使得在单台计算机下采用共享内存的方式能够取得较好的重建效率.本文通过详细分析传统并行实现的重谱法重建方法的特点和重建效率,从优化重建过程中通信过程和数据交换的角度,提出并实现了基于MPI和共享内存的全共享低交换的并行高分辨图像重建方法.通过采用此并行方式实现的重谱法和K-T法图像重建算法,极大地减少图像重建过程中的通信过程和数据交换,降低重建过程中的通信耗时开销,很大程度提升重谱法和K-T法图像重建效率;通过实验重建ONSET和NVST两个不同口径的太阳观测望远镜数据,均取得了非常好的重建效率,满足了该望远镜的数据处理需求,说明此方法具有一定的高效性和普适性.

另外,通过采用此方法,在单台服务器下便能取得非常好处理效率,不仅便于实际的灵活应用,而且能节省大量的设备成本.理论上在内存充足的情况下,计算机CPU核数越多,采用全共享低交换并行图像重建方法的重建效率会越高.本文的研究成果,有望解决困扰NVST和ONSET当前高分辨重建中的相关难题,大幅度降低数据存储压力,实现实时的高分辨重建,提高两个望远镜的科学产出.在未来的研究工作中,将对此类并行编程模型实现的重谱法图像重建方法进行进一步的优化,使其能够更好地适应太阳望远镜的海量数据处理需求.

表2 两种重建方法下,图像重建各模块的耗时

Table 2 The time elapsed of image reconstruction modules in two reconstruction methods

模块	ONSET图像重建测试数据(ms)		NVST图像重建测试数据(ms)	
	传统方法 重建耗时	全共享低交换 并行方法耗时	传统方法 重建耗时	全共享低交换 并行方法耗时
接收子块图像数据/从共享内存中获取数据	2	2	26	42
计算子块图像偏移量	2	1	55	54
子块图像二次对齐过程通信	13	0	346	0
计算截取对齐后的子块图像数据	2	2	42	41
重建子块图像中目标的相位和模	5	5	191	192
将子块图像族重建结果发到主进程	17	0	301	0
子块图像重建总耗时	41	10	961	329
所有子块图像重建总耗时	28623	7452	14652	4929
子块图像拼接成单帧高分辨图像耗时	4925	5024	686	709
重建一帧图像总耗时	33.5 s	12.4 s	15.3 s	5.6 s

图 3 NVST TiO和ONSET Ha高分辨重建结果. NVST TiO单帧斑点图像(a)和重建结果图像(b), ONSET Ha单帧斑点图像(c)和重建结果图像(d)
Figure 3 High resolution reconstructed results of NVST TiO and ONSET Ha. NVST TiO speckle image (a) and reconstructed result image (b), ONSET Ha speckle image (c) and reconstructed result image (d)

参考文献

- 1 Xiang Y Y. High resolution and high speed reconstruction algorithms of the solar image (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2016 [向永源. 太阳高分辨高速重建算法的研究. 博士学位论文. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2016]
- 2 van Noort M, Van Der Voort L R, Löfdahl Mats G. Solar image restoration by use of multi-frame blind de-convolution with multiple objects and phase diversity. *Solar Phys*, 2005, 228: 191–215
- 3 Rimmele T R, Richards K, Hegwer S, et al. First results from the NSO/NJIT solar adaptive optics system. *Proc SPIE*, 2004, 5171: 179–186
- 4 Marino J, Woger F, Rimmele T. Analysis of adaptive optics control for the advanced technology solar telescope. *SPIE*, 2010, 77363E
- 5 Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, et al. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory (in Chinese). *Chin J Quantum Electron*, 2006, 3: 295–302 [饶长辉, 姜文汉, 张雨东, 等. 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统. 量子电子学报, 2006, 3: 295–302]
- 6 Weigelt G P. Modified astronomical speckle interferometry “speckle masking”. *Opt Commun*, 1977, 21: 55–59
- 7 Wöger F, Lühre O V D. KISIP: A software package for speckle interferometry of adaptive optics corrected solar data. In: *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*. 2008, 7019
- 8 Cao W, Gorceix N, Coulteret R, et al. Nasmyth focus instrumentation of the new solar telescope at big bear solar observatory. *SPIE*, 2010, 7735: 77355V
- 9 Li X B, Wang F, Xiang Y Y, et al. Parallel image reconstruction for new vacuum solar telescope. *J Kor Astron Soc*, 2014, 47: 43–47
- 10 Tang R L, Tian Y, Zhong L B, et al. Adaptive solar speckle image reconstruction based on multi-core CPU (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2017, 6: 104–109 [唐若林, 田雨, 钟立波, 等. 基于多核 CPU 的太阳自适应图像斑点重建技术. 激光与光电子学进展, 2017, 6: 104–109]
- 11 Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron Astrophys*, 1970, 6: 85
- 12 Liu Z. Research on high-resolution image reconstruction and spatial characteristics of astronomical images (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2003 [刘忠. 天文图像高分辨重建及空域性质研究. 博士学位论文. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2003]
- 13 Zhong L B. High-resolution reconstruction techniques of the solar images (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015 [钟立波. 太阳高分辨力图像重建技术研究. 博士学位论文. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015]
- 14 Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron Astrophys*, 1970, 6: 85–87
- 15 Woger F, von der Luhe O, Reardon K. Speckle interferometry with adaptive optics corrected solar data. *Astron Astrophys*, 2008, 488: 375–381
- 16 Qiu Y H. Fourier modulus recovery in astronomical speckle imaging and the experiments of image reconstruction (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2000, 20: 501–508 [邱耀辉. 天文斑点成像中的傅里叶模复原和像复原实验. 光学学报, 2000, 20: 501–508]
- 17 Pehlemann E, von der Luhe O. Technical aspects of the speckle masking phase reconstruction algorithm. *Astron Astrophys*, 1989, 216: 337–346
- 18 Li X B. Research on technologies of massive data parallel processing for solar telescope (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2015 [李雪宝. 太阳望远镜海量数据并行处理技术研究. 博士学位论文. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2015]
- 19 Faurobert M, Fang C, Corbard T, et al. ONSET—A new multi-wavelength solar telescope. *Eas Publ*, 2012, 55: 349–352

Summary for “一种全共享低交换并行高分辨太阳图像重建方法”

A global-shared and low-exchange parallel method of high resolution solar image reconstruction

Pengxiang Liu¹, Kaifan Ji², Hui Deng¹, Ying Mei², Cuiyin Liu¹, Shoulin Wei^{1,2}, Wei Dai^{1,2} & Feng Wang^{1,2*}

¹ Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

² Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China

* Corresponding author, E-mail: cnwangfeng@gmail.com

The high resolution image reconstruction takes an important place in the solar physics research, but the solar high resolution observation has been hindered severely for a long time due to huge observation data volume, slow reconstruction speed and other factors. In order to treat the huge volume of quasi real-time solar observation data and cope with the computing burden of the same magnitude for high resolution reconstruction of solar image, a number of advanced ground-based solar telescopes at home and abroad have adopted the speckle masking, a method of reconstruction algorithm that can be parallelly realized, to reconstruct the high resolution image. Good treatment results are obtained from this method. However, it is still hard to meet the demand for solar observation data treatment at the current efficiency, since the volume of solar telescope observation data is increasing.

This paper is directed at the demands of China's new solar telescopes such as the NVST (The 1 m New Vacuum Solar Telescope) and ONSET (Optical and Near-Infrared Solar Eruption Tracer). By analyzing the computing time of each module with the Triple-Spectral method through actual measurement, the paper reaches a conclusion that the data exchange performance is a key bottleneck affecting the reconstruction effect. On this basis, the paper puts forward a universal method of global-shared low-exchange parallel high resolution image reconstruction. This method takes the Triple-Spectral as the core algorithm for image reconstruction and uses the message passing interface (MPI) and shared memory mechanism, allowing the reconstruction computing process to read and write the data in the shared memory at high speed after algorithm optimization. The shared memory, which is created for storage of image data and image reconstruction results respectively according to the size of the image, will be subsequently mapped into each process, giving access to read the processing data and store the reconstruction results independently. While computing the image reconstruction, each child process will not apply the MPI communication to obtain the sub-block image data. Instead, it will read the associated data from the shared memory according to the sub-block image numbering. After the sub-block image reconstruction is done, each child process will store the reconstruction results directly into the shared memory according to the sub-block image numbering, instead of sending the results to the host process via MPI communication. In this way the communication between processes is reduced, the communication time saved and the data exchange efficiency improved.

The experiment results show that on one 16-core PC server, it takes only about 12.4 s for reconstructing the 100-frame ONSET 1660×1660 pixel image and 5.6 s for the 100-frame NVST 1024×1024 pixel image under this method. Good efficiency is achieved in the reconstruction of solar telescope data for ONSET and NVST with different apertures, proving that this method has certain efficiency and universality. The parallel combination of the Triple-Spectral and K-T has greatly reduced the communication process and data exchange in the course of image reconstruction, saved the communication time and improved the reconstruction efficiency. To be further mentioned, the achievement of good efficiency on one server would bring the method into flexible application and save the equipment cost substantially. With the aid of the research outcome of the paper, it is expected to tackle the puzzles remained in the high resolution reconstruction of NVST and ONSET, and bring down the data storage burden. Its fulfillment of real-time high resolution reconstruction has laid a solid foundation for the follow-up researches.

image reconstruction, Triple-Spectral, global-shared, low-exchange, message passing interface (MPI), shared memory

doi: 10.1360/N972017-00818