

文章编号 1004-924X(2009)05-1149-12

并行图像复原与超分辨处理系统的设计与实现

马冬冬, 李金宗, 朱 兵, 穆立胜

(哈尔滨工业大学 图像信息技术与工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为实现海量大尺度图像的复原与超分辨算法的实时处理,设计了图像复原和超分辨并行处理系统,对该系统的技术方案、工作原理、关键算法、硬件结构和并行技术进行了研究。根据技术方案,介绍了系统的工作原理及解模糊、去噪和超分辨等关键算法。对数字信号处理(DSP)和机群两种体系结构进行了分析和比较,结果表明机群更适合于大规模并行处理,给出其设备选型的原则。提出了基于 PPF 结构的并行算法模型和基于 MPI+OpenMP 混合结构的多层次并行与优化技术。最后,对算法在 DSP 和计算机系统上的处理效果和速度进行了实验和分析,给出了系统规模和性能的预测,确定了关键参数即处理器数目的选择依据。实验结果表明,该系统可将处理时间由 2 700 s 降低到 29.39 s,处理后的图像的清晰度、对比度和分辨率显著提高,满足应用需求并具有一定的通用性。

关键词:图像复原;超分辨系统;数字信号处理;机群;并行

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Implementation of parallel image restoration and super-resolution processing system

MA Dong-dong, LI Jin-zong, ZHU Bing, MU Li-sheng

(*Institute of Image Information Technology and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: A parallel processing system was developed to realize the real-time restoration and super-resolution processing of a huge amounts of large size images after investigating its technical scheme, working principle, key algorithms, hardware architectures and parallel technology. The working principle of the system and key algorithms of deblur, denoise, super-resolution were presented based on the technical scheme, and two kinds of the architectures, Digital Signal Processing(DSP) and Cluster systems, were analyzed and compared. It is concluded that the Cluster system is more large scale parallel processing. A parallel algorithm model based on the PPF architecture and a multi-layer parallel optimization technology based on the hybrid architecture of MPI+OpenMP were introduced. The processing effect of the proposed algorithm and the processing speed on the DSP and computer were analyzed. Following by prediction of the scale and performance of system, How to choice the number of processors was also discussed. Experimental results show that the parallel system can reduce run time from 2 700 s to 29.39 s, and can provide improved images with better sharpness, contrast and resolution.

收稿日期:2008-07-18;修订日期:2008-09-11.

基金项目:“十一五”国家重点资助项目(No. 51322020703)

Key words: image restoration; super-resolution system; Digital Signal Processing(DSP); cluster; parallelism

1 引言

图像复原与超分辨率处理属于数据和计算密集型服务,虽然近年来在算法、系统结构和应用普及程度上都取得了长足的进展^[1],但面临新的数据复杂化和处理高速化的挑战,利用并行技术进行多机处理来满足实时应用的需求很有必要。高速的并行图像处理系统是日前图像处理和计算机学科研究的热点,其应用覆盖图像处理的各个领域。如文献[2]采用三片 ADSP21060 DSP 以流水线方式进行分数傅里叶变换(FFT)、卷积和逆分数傅里叶变换(IFFT)操作,然后使用 4 片反投影专用处理器,完成医学图像的并行反投影处理;文献[3]利用现场可编程门阵列(FPGA)+数字信号处理(DSP)结构,构成具有多通道并行能力、部分可重构性和自适应性的空间计算机,速度可达 10 000 MIPS,用于卫星运行时强辐照环境下的并行图像处理;文献[4]采用由 Myrinet 网络连接的 48 个双核 SMP 机群,通过弹性配准从线性和非线性变形图像中提取关键信息,继而完成人脑细胞层图像的重建;文献[5]则利用 9 个 T800 处理器组成处理器阵列,实现了合成孔径雷达图像的超分辨率处理。

上述各系统实现方式多样,底层硬件差异明显,使设计者在应用选择时无所适从。本文对当前并行图像处理领域中最常见的 DSP 和机群两种体系结构进行了研究、分析和比较,给出了实际应用中具有一般性的选择原则。另外,上述各系统一般规模较小或功能单一,不能满足海量图像数据大规模、多功能并行应用的需求。对于一个要求每天处理约 1 000 帧图像,每帧大小约为 $10\,000 \times 10\,000$ pixel(传输和存储量约 100 MB)的资源卫星图像处理系统,要在不超过半分钟的时间内完成单帧图像的复原与超分辨率等操作,必须引入大规模并行技术。本文以上述应用为背景,对相关算法、硬件结构和并行技术等进行研究,力图使系统设计适应于算法和硬件,从而在保证处理效果的同时实现实时处理,并使系统具有较强的自适应性和鲁棒性。

2 图像复原与超分辨率处理系统

2.1 系统技术方案及工作原理

通过理论分析、仿真实验和对关键技术等的反复研究,本文建立了由图像分析、图像复原、图像超分辨率(含抑制振铃操作)处理和效果评价 4 个主要模块组成的图像复原与超分辨率处理系统的技术方案,其简化框图如图 1 所示。

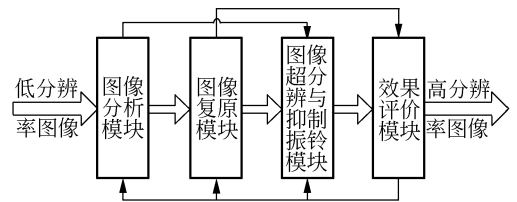


图 1 图像复原和超分辨率处理系统技术方案简图
Fig. 1 Block diagram of image restoration and super-resolution processing system

系统工作原理如下:首先对输入的图像进行模糊分析、信噪比分析和云雾分析,把分析结果分别与模糊标准、信噪比标准和云雾标准进行比较,判断是否需要对应的操作,然后把结果传递给控制器和图像复原模块的组合。另外还要对图像进行频谱分析,与频谱混叠标准比较,得到相应的控制参数,传递给超分辨率处理和抑制振铃模块。最后,通过评价参数的计算实现对系统的监控和反馈操作,保障输出图像的质量。

2.2 系统关键算法分析

系统的算法流程图如图 2 所示。需要注意的是,由于不同类型图像的成像模型和特性存在一定的差异,为使算法和系统具有自适应性和鲁棒性,需要建立包含不同先验模型的先验信息库,如降质算子、噪声的概率模型和调制传递函数(MTF)等。通过建立这些先验模型以及对大量图像的反复研究和分析,定量确定混叠深度、模糊度、信噪比和云雾干扰等参数与图像质量的关系,进而确定混叠标准、模糊标准、信噪比标准和云雾标准等。

本系统涵盖很多算法,如解模糊模块中的基于 FFT 的盲目反卷积算法和约束最小二乘法,增

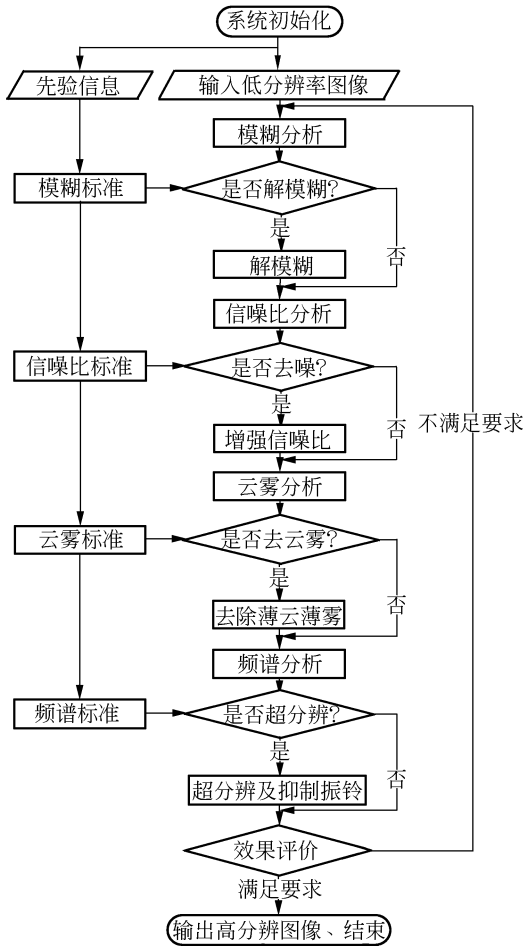


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm

强信噪比模块中的基于二阶偏微分方程的各向异性扩散算法、改进的陷波带阻滤波算法和引入梯度限制的中值滤波算法,抑制云雾模块中的基于同态滤波^[6]和小波多分辨率分析^[7]的方法,以及超分辨率模块中的频域内插与增强算法等。下文只对部分关键算法进行说明。

2.2.1 解模糊算法

解模糊实质上是反卷积过程,主要采用基于 FFT 的有限支持域上的迭代盲目反卷积算法,可使图像的峰值信噪比(PSNR)提高 10 dB 以上,对比度提高 8 dB 以上。

有限支持域上图像降质的数学模型一般可表示为:

$$f(x,y) = \iint_D h(x-s,y-t)g(s,t)dsdt + \xi(x,y), \quad (1)$$

式中, D 是二维平面上的一个有限支持域(有界区域)。观测图像 $f(x,y)$ 是一个完全卷积,因而真实图像 $g(x,y)$ 和点扩散函数 $h(x,y)$ 都是有限支持的。 $\xi(x,y)$ 为加性噪声,乘性噪声包含在 $h(x,y)$ 中。二维盲目反卷积等价于二变量多项式盲目分解,一般是超定的,离散化和限制解的支持域能有效解决这一问题。

离散情况下,给定一个有限支持域上的观测图像 $f(k,l)$,盲目反卷积问题可转换为寻找图像 $g(k,l)$ 和 $h(k,l)$ 的估计,使下式最小化:

$$E_0(f,g * h) = \sum_{k=0}^{L_1-1} \sum_{l=0}^{L_2-1} [f(k,l) - g(k,l) * h(k,l)]^2, \quad (2)$$

式中, E_0 表示 Euclid 距离,假定 $f(k,l)$ 限制在一个大小 $L_1 \times L_2$ 的矩形区域内。利用 Parseval 定理,即时频能量守恒定理,上式在频域内等价于:

$$E_0(f,g * h) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{m=0}^{L_1-1} \sum_{n=0}^{L_2-1} |F(m,n) - G(m,n)H(m,n)|^2. \quad (3)$$

需要注意的是, $g(k,l)$ 和 $h(k,l)$ 的 FFT 也必须补零到 $L_1 \times L_2$ 。

给定一个 $h(k,l)$ 的估计初值 $h_0(k,l)$ (如一个维的随机数矩阵),利用 FFT 可以实现图像从时域到频域的反复变换,在此过程中加入期望的限制从而在两个域中对信号进行不断的修改,最后得到期望的图像。将频域估计用维纳滤波来实现,可使 FFT 迭代算法更合理。频域估计的计算公式为:

$$\hat{G}(m,n) = \frac{\hat{H} * (m,n)F(m,n)}{|\hat{H}(m,n)|^2 + \frac{S_m(m,n)}{S_{gg}(m,n)}}, \quad (4)$$

$$H(m,n) = \frac{\hat{G} * (m,n)F(m,n)}{|\hat{G}(m,n)|^2 + \frac{S_m(m,n)}{S_{hh}(m,n)}}, \quad (5)$$

式中, $S_{gg}(m,n)$ 、 $S_{hh}(m,n)$ 和 $S_m(m,n)$ 分别表示输入信号、卷积核和噪声的功率谱。令

$$\gamma_g = \frac{S_m(m,n)}{S_{gg}(m,n)}, \gamma_h = \frac{S_m(m,n)}{S_{hh}(m,n)}. \quad (6)$$

γ_g 和 γ_h 是两个较小的常数。一般如果图像信噪比较低,用较大的 γ_g 和 γ_h 可以保证解的平滑性,但是改善速度较慢。反之,太小的 γ_g 和 γ_h 有可能使结果较快地接近一个不平滑的逆滤波解。

需要注意的是,上述算法不具收敛性,但大量

实践结果表明,只需几步迭代就能得到 $g(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的近似估计。

2.2.2 增强信噪比算法

主要采用基于二阶 PDE 的非线性各向异性扩散算法,在有效抑制平滑区域和边缘纹理处的噪声的同时,能很好地保护阶跃型强边缘和较弱的细节纹理,又不会使边缘纹理发生位移和产生虚假纹理。处理高斯噪声污染的图像,可使峰值信噪比提高 3~4 dB;处理泊松噪声污染的图像,可使峰值信噪比提高 2~3 dB。在尺度空间理论^[8]和改进的非线性扩散模型^[9]的基础上,可得算法公式如下:

$$\begin{cases} \partial_t f = \operatorname{div}(\tilde{c}(|\nabla(G_\sigma * f)|^2 + (G_\sigma * f_{xx})^2 + \\ 2(G_\sigma * f_{xx})^2) \nabla f) \\ f(x, y, 0) = f_0(x, y) \end{cases} \quad (7)$$

式中,尺度参数 $t \in \mathbf{R}$ (\mathbf{R} 为非负实数集合); f 为扩散图像函数 $f(x, y, t)$ 的简写, $f_0: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$ 为原始含噪二维图像, $(x, y) \in \mathbf{R}^2$; c 为扩散系数; G_σ 表示均值为 0, 标准差为 σ 的高斯函数; $\nabla(G_\sigma * f)$ 为 f 的一阶高斯偏导, $G_\sigma * f_{xx}$ 、 $G_\sigma * f_{xy}$ 、 $G_\sigma * f_{yy}$ 为 f 的二阶高斯偏导。需进一步说明的是:

$$f(x, y, t) = \begin{cases} f_0(x, y) & t=0 \\ (G_\sigma * f_0)(x, y) & t>0 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\tilde{c}(s) = c(\sqrt{s}), \quad (9)$$

$c(s)$ 一般为 e^{-s} 或 $s/(1+s^2)$ 。

式(7)的离散格式表示为:

$$\frac{f^{l+1} - f^l}{\Delta t} = \operatorname{div}(c(|\nabla(G_\sigma * f)|^2 + (G_\sigma * f_{xx})^2 + 2(G_\sigma * f_{xy})^2 + (G_\sigma * f_{yy})^2) \nabla f^l), \quad (10)$$

式中, Δt 为迭代步长, l 为迭代次数。

2.2.3 超分辨算法

主要采用单帧频域内插与增强技术进行图像超分辨处理。首先对图像进行分析,通过频率混叠深度(FAD)参数 C_4 判定是否采用单帧超分辨方法;然后通过 FFT、频域变换与补偿滤波和 IFFT 等操作,得到高分辨率图像。

C_4 的提出和提取以及频率补偿滤波器的设计是图像超分辨处理的两个关键技术。 C_4 可作

为选择超分辨方法的控制参数,而单帧频域内插与增强技术实质上是在 FFT 插值的基础上,引入频率补偿滤波器。

C_4 的提取过程包括:(1)对低分辨率图像进行 FFT;(2)对低分辨率图像的频谱进行全局多项式最小二乘拟合;(3)对拟合以后的频谱中的低频成分和高频中心能量,进行二次截断拟合;(4)对二次截断拟合的频谱进行频谱拓展,进而估算出 C_4 。

设计频率滤波器时要考虑在超分辨的同时抑制振铃,其设计要遵循以下 3 个原则:(1)保持图像的原有信息,尽可能地恢复丢失的高频信息;(2)所设计的抑制振铃的模型是可控的,与频谱混叠程度相关;(3)操作简单可靠,尽量减少计算量,以利于实时处理。

建立频率补偿滤波器的一维数学模型为:

$$H(n) = \begin{cases} A \exp(-\frac{n^p}{\omega}) & 0 \leq n \leq N_1/2 \\ A \exp(-\frac{(N_1-n)^p}{\omega}) & N_1/2 < n \leq N_1 \end{cases}, \quad (11)$$

式中, n 为频谱点, N_1 为频谱宽度, A 、 ω 和 p 为控制参数。 A 为插值倍数,一般取 $A=2$ 。插值使低频和高频能量都增大了 2 倍,所以 ω 的取值应使频谱变换后高频中心的能量原频谱高频能量的一半,即应使 $H(N_1/2)=1$ 。根据式(11), ω 的选择应满足:

$$\omega = \left(\frac{N_1}{2}\right)^p / \ln 2. \quad (12)$$

可见, ω 的选择与 p 有关。当 C_4 较大时,可能引起的振铃程度较大, p 应该选择得较小;反之,当 C_4 较小时,可能引起的振铃程度较小, p 应该选择得较大;当没有振铃或振铃较轻时, $p \rightarrow \infty$, 相当于 FFT 插值。

把频域补偿技术和频域内插技术相结合,使用由式(11)建立的频率补偿滤波器的频率响应函数,可以得到频域补偿后的一维频率函数:

$$G(k) = \begin{cases} H(k) \cdot F(k) & 0 \leq k < N/2 \\ F(k) \cdot [A - H(k)] & N/2 \leq k < N \\ F(k-N) \cdot [A - H(k-N)] & N \leq k < 3N/2 \\ H(k-N) \cdot F(k-N) & 3N/2 \leq k < 2N \end{cases}, \quad (13)$$

式中, $H(k)$ 为式(11)中的频率补偿滤波器频率响应函数, $G(k)$ 为高分辨率信号频谱, N 为原始图像的频谱宽度。频域补偿滤波器不但能消除可能引起振铃现象的频率突变,而且可补偿在 FFT 插值法中损失掉的高频信息,因此对二维图像来说可提高分辨率。

3 并行系统硬件设计关键技术

硬件系统设计中,体系结构的研究和分析以及设备的选型是关键。

3.1 硬件系统体系结构的研究和分析

硬件系统体系结构的研究和分析是系统设计的基础,有利于实现算法到结构的最优转换,从而设计出高效的并行图像处理系统。对并行图像处理系统发展趋势的研究可以看出,通用系统随着性能的大幅提升,以其系统代价低、移植性好和可扩展性高等优点,逐渐取代了专用系统的主导地位,目前主要是基于 DSP 和机群两种结构。

对并行图像复原与超分辨处理系统的指令流和数据流的分析可以看出,本系统属于 MIMD 或 SPMD 结构,其硬件实现可从采用“主从”结构的 DSP 系统^[10-12]和使用混合编程模型的机群系统^[13]之间进行选择。因此,本文对两类系统的主要特征进行了分析和比较,如表 1 所示。

从表 1 中可看出,两类系统各有所长,根据应用特点,要重点考虑两者的执行效率和大规模并行能力。进一步的研究表明,DSP 系统的并行性可分为两个层次:片内隐式并行和片间显式并行。DSP 芯片的内部采用程序和数据分离的哈佛结构,具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,提供特殊的 DSP 指令,因此其执行效率较高,可以用来快速地实现各种图像处理算法。但是,在多 DSP 系统中,片间并行是通过链路口以 DMA 的方式进行通信的,其速度依赖于片外存储器的读取速度,通信速度较慢,并且 DSP 对内存、系统控制、协议等的支持能力较弱,因此不利于大规模并行。机群系统则相反,虽然同频率下单机执行效率较低,但通信性能和大规模并行能力却要强很多,而且其单机效率低的缺点可以通过高主频及多核化来弥补。

表 1 DSP 系统和机群系统的特征对比

Tab. 1 Characteristic comparison between DSP and cluster systems

系统特征	系统类型	
	DSP 系统	机群系统
执行效率	高	低
功耗	低	高
大规模并行能力	弱	强
性价比	低	高
稳定性	强	弱
体积和空间占用	小	大
灵活性	弱	强
可编程性	难	易
片间通信	复杂	简单
开发周期	长	短
可扩展能力	弱	强
处理器发展速度	慢	快

通过上述分析可知,在进行并行图像处理系统硬件实现方式的选择时,系统规模是关键:当系统规模较小时,选择 DSP 结构较优;而系统规模较大时,则应选择机群结构。本应用属于大规模并行系统(两类系统的规模预测分别见 5.1 和 5.2 节),结合 5.3 节的实验分析,选择了 SMP 机群系统作为硬件实现方式。

3.2 设备选型的原则

确定硬件实现方式后,可建立如图 3 所示的系统结构示意图,选用了胖节点的 SMP 计算机作为计算节点,Infiniband 交换机作为网络交换设备,光纤磁盘阵列作为系统的 I/O 设备。

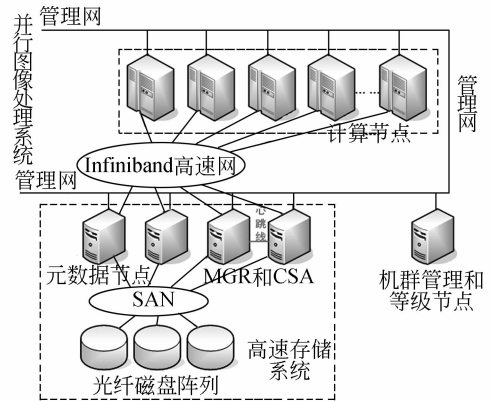


图 3 并行图像处理系统结构示意图

Fig. 3 Framework of parallel image processing system

3.2.1 胖节点的选型原则

本系统采用 MPI 和 OpenMP 进行混合编程,若选用双核节点,需要约 64 个计算节点,其作业提交时间在 10 s 左右,约占总任务时间的 30%~40%(要求在 30 s 内完成一个任务),且无法通过程序优化来降低,是系统难以承受的。而采用胖节点,可更好地发挥 OpenMP 的效能,大大降低 MPI 的网络开销,为完成任务提供了有力保障。同时,还可以节省网络设备的成本,提高性价比。

3.2.2 Infiniband 网络的选型原则

互连网络的正确选择是达到甚至超过系统预期性能的关键。基于千兆以太网的网络,通过 TCP/IP 通道来传输信息,其缺点是需占用大量 CPU 资源来处理网络通信,从而导致整体处理效率的下降;而 Myrinet 和 Infiniband 等专用高速网络通过采用卸载引擎(offload engine)技术降低了 CPU 资源在处理通信方面的消耗,在拥有千兆以太网两倍/数倍的带宽的同时,大大降低了网络延迟。其中,Infiniband 的端口带宽为 20 Gb/s、交换机间连接带宽为 60 Gb/s,交换机的延迟为 0.14 μ s。

本系统支持多种类型的数据流,采用了两套网络系统:一套是 Infiniband 网络,可作为系统计算节点的连接网络,计算节点间的通信由它来完成。同时,它还是处理系统和高速文件系统的连接网络,系统所有的 I/O 请求都通过它访问高速文件系统。另一套网络是机群管理网络,采用千兆以太网,主要是用于整个机群系统的管理、监控和维护。

3.2.3 光纤存储的选型原则

数据是图像处理系统的核心,其安全性、可靠性、有效性是系统的生命。大规模并行图像处理系统的数据容量非常可观,在存储设备上可采用在线存储、近线存储和离线存储 3 种方式。其中在线存储最为关键,它能提供的 I/O 带宽、容量和可扩展能力,对整个系统的性能至关重要。

本系统选用了带宽高、可扩展性强的光纤存储设备,配合并行文件系统,进一步提高系统的 I/O 性能。从存储容量上看,每天约 1 000 帧图像,每帧图像大小约为 100 MB,经过几何校正处理后约为 150 MB。因此,每天的输入数据量为 $150 \text{ MB} \times 1\,000 / (1\,000 \times 1\,000) = 0.15 \text{ TB}$ 。考

虑到存储数据至少包括输入、输出两部分,则每天的数据量为 0.3 TB。而系统中在线存储设备上至少要保存 3~5 天的数据量,所以总数据量为 $0.3 \times 5 = 1.5 \text{ TB}$ 。还应该给存储器留有 30% 的裕量,存储设备容量至少应为 $1.5 \text{ TB} / 70\% = 2.2 \text{ TB}$,故可先配置 3 TB 容量的光纤硬盘。

4 并行系统软件设计关键技术

软件系统设计框图如图 4 所示,其中并行算法模型的建立和并行性能的优化是关键。

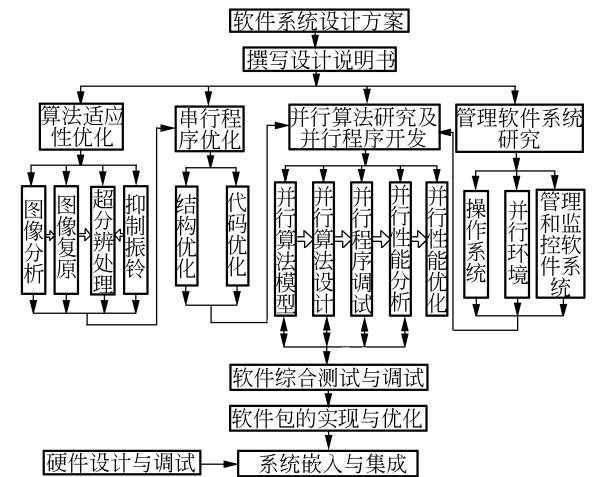


图 4 软件系统设计框图

Fig. 4 Block diagram of software system design

4.1 基于 PPF 结构的并行算法模型

在图像处理“金字塔”结构中,图像复原与超分辨率技术属于底层即数据层的操作,其处理对象以像素及其邻域为主,虽然数据量相对于其它层较大,但由于局部数据之间的相关性较小,较少涉及知识及人工干预,该层大多数算法的并行化潜力都很大。流水线(软流水)并行(MISD/MIMD 结构,任务分解)和数据并行(SIMD/SPMD 结构,域分解)是该层并行化最普遍的两种方法。

流水线并行^[14]是指将图像处理过程按照功能划分为一系列子过程,然后利用功能部件分离和时间重叠的方式实现并行处理,其特点是处理速度快、寻址方式固定、功能扩展代价低,系统灵活性高,但总体吞吐率由最慢的任务决定,软件功能不可扩展,通常不能把处理过程分解成任意数目并发的任务。

数据并行是指把图像分块后分配到通过网络

或者总线连接的不同处理器上,各处理器执行同一操作并对不同的数据进行处理,是数据层里更普遍和更有效的并行方法。数据在不同处理器之间的分配和存储策略有两种,即静态分配和动态分配^[15],前者具有通信少效率高的优点,但容易引发负载平衡问题;后者可以很好地解决负载平衡问题,但必须在计算时间远大于通信和传输时间的情况下才能有效应用。

在图像复原与超分辨处理的过程中,分块后的子图像即使像素是均匀分布的,所包含的信息量可能也不一致,而且各模块的操作量也不相同,负载不平衡确实存在。又鉴于在处理过程中,像素级和邻域级操作占主导地位,局部相关性较小,处理器能够独立并行地工作,无需过多通信,计算远大于通信,故应选择动态数据分配方式。

根据上述分析,本系统可设计成流水线并行和数据并行的混合结构,即流水线处理数据动态分配结构(Pipeline Processor Farming, PPF)。具体实施步骤如下:

(1)根据技术方案,首先把系统划分成一系列并发执行的功能(任务)流水组件,同时不同的处理器上执行,通过流水阶段的重叠来实现加速。即输入一帧图像,先执行的任务完成相应的处理后立即把中间结果传给下一个任务,再接着处理下一帧图像,这样可使计算和通信进行有效重叠,提高处理的效率,如图1主线所示。此步骤实质上相当于把流水线的MIMD结构分解成若干个SIMD结构,以便进行数据并行。

(2)流水线中运算量较大的组件,如图像复原模块和超分辨处理模块,算法复杂度高、运行时间长,影响整个系统的吞吐量。因此,在这些模块中,需对图像分块后利用数据动态分配方式进行处理:设置一个(主)控制单元,负责图像的分块、分配、收集和合成等操作;分块后的数据被分配到相应的处理单元上,每个处理单元都能独立地执行任务;控制单元根据每个处理单元上负载的实际情况,采取优化匹配策略^[16]调整负载分配,以保证动态数据分配的合理性和最优化,从而使处理单元之间负载均衡;各处理单元完成任务后,把处理结果返回给控制单元进行图像合成并输出结果;接收下一帧图像。整个过程可用图5所示的动态数据分配并行模型表示。

图像分块时,需注意边缘问题。像素级操作

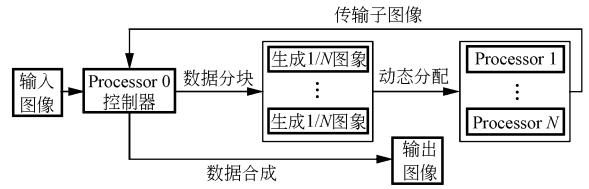


图5 动态数据分配并行模型

Fig. 5 Parallel model of dynamic data distribution

在各块内部进行,无需处理器之间进行通信,不涉及此问题。而邻域级操作在各块的边缘部分需跨块执行,为了避免由此引发的处理器之间的通信所导致系统性能的降低,可在数据划分时进行边界复制,其大小由最大的模版窗口决定。

PPF结构结合了流水线并行和数据并行的优点,与MPI+OpenMP的混合编程模型相得益彰:节点间的任务划分和通信由MPI进行管理,开发进程级的粗粒度并行;节点内的动态数据并行符合OpenMP标准,开发循环级的细粒度并行;节点间到节点内的动态数据分配采用fork-and-join的模式,控制器即为主线程,有利于动态调整负载平衡。节点内利用并行循环的调度方法来达到负载平衡,从而尽量减少动态负载平衡的开销以降低通信成本。因此,PPF结构能够在系统的一般性、性能和负载之间做出平衡,同时增强了硬件系统的可扩展性和软件系统的可移植性、可延伸性。

4.2 多层次并行与优化技术

MPI和OpenMP的混合编程模型提供了两级并行机制,其执行效率高于纯MPI和OpenMP程序,并解决了一些它们无法解决的问题,如负载均衡、数据拷贝、MPI进程数受限、通信带宽和延迟以及通信和计算的重叠等。开发基于混合编程模型的高效并行系统需要至上到下依次对每个层次的并行性进行充分挖掘。

4.2.1 MPI并行与优化技术

MPI粗粒度并行化的核心是对通信和I/O性能进行优化,尽量减少通信量和通信开销,可通过以下几种途径进行优化:

(1)任务划分:根据系统任务和算法的特点确定合适的划分点,必要时通过数据/控制相关性转换与消除以支持划分;任务划分不能无限细化,要寻求最优划分;实现应用并行性到计算平台并行性的映射,结合数据分配优化技术,减少远程I/O

和消息传递。

(2)数据划分:对数据划分进行分析,看其是否达到最优。数据划分的原则是使程序的并行性尽可能地得到开发,通信开销最小且负载均衡,同时提高操作的局部性。

(3)动态负载均衡:要在负载均衡的系统开销与负载不均衡所导致的性能损失之间进行折衷。

(4)消息管理:可将多个单独的消息合并成一个消息集一次传递,从而减少消息传递的启动次数和时间;尽量采用 MPI 提供的广播、移位等功能;根据各进程的优先级别,使用非阻塞发送函数 MPI_Isend() 和非阻塞接收函数 MPI_Irecv() 进行消息发送和接收的管理。

4.2.2 OpenMP 并行与优化技术

OpenMP 细粒度并行化的核心是对循环进行并行化,尽量减少通信和同步,遵循以下原则:

(1)循环并行化:尽量选择计算时间占全局时间比例较大的循环,并行化后可显著提高性能;对循环并行化所带来的性能提升和由此引起的调度开销进行权衡;并行不能改变循环原有的语义。有迭代依赖关系的循环,应先去除其相关性或依赖关系。对于计算量很大对性能有明显影响而又不能去除其相关性的循环,可进行改写。

(2)在 OpenMP 并行区域内不进行通信:节点内多线程共用的代码间的通信会使带宽竞争急剧增加。

(3)在单个线程中尽量不要通信:尽可能地减少线程中的通信次数,或把需要进行消息传递的代码改写到线程外进行通信。线程中的同步次数是影响性能的一个重要因素,应慎重使用同步和蕴含同步的操作。

(4)避免节点内不必要的数据拷贝。

5 实验结果及分析

在 DSP 和计算机系统上,分别进行了图像复原与超分辨处理算法的移植和优化,以进一步检验和比较其处理效果和执行速度(非效率)。同时,结合性能指标的要求给出了理想状态下(忽略 I/O 时间,系统具有线性加速比,并行效率为 100%)两类系统规模的预测,进而确定了硬件实现方式。然后,对非理想状态下并行图像处理系统的性能进行了分析,给出了关键参数——处理

器个数的选择依据。

超分辨算法的效果可以用处理前后图像对比度的改善因子 T_e 来衡量和评价。

$$T_e = 20 \lg J_{e1} / J_{e2}, \quad (14)$$

其中, J_{e1} 和 J_{e2} 分别表示处理前后图像的对比度。对比度可以通过计算图像的各个点与其周围 4 个点的灰度差绝对值得到,其计算公式为:

$$J_e = \sum_{k,l} [|f(k,l) - f(k-1,l)| + |f(k,l) - f(k,l)|] + \sum_{k,l} [|f(k,l) - f(k+1,l)| + |f(k,l) - f(k,l+1)|]. \quad (15)$$

实际使用中,需先对原图进行直方图均衡,再计算 J_{e1} 。

5.1 DSP 系统上的实验测试

(1)实验环境:硬件环境:中科院声学所设计的 ADI TigerSHARC TS101S DSP 开发板,集成 4 个 TS101S(实验时使用单个),内存为 512 M SDRAM,配合工控机进行使用;TS101S 的主要性能:300 MHz 的运行速度、3.3 ns 的指令周期、6 Mb 的片内 SARAM、双运算模块和双整数 ALU;软件环境:操作系统 Windows XP SP2, DSP 软件开发环境 ADI Visual DSP++。

(2)实验步骤:1)把图像复原与超分辨处理程序移植到 Visual DSP++ 中;2)尽可能地进行了代码和性能优化,使用多种优化技术,如 DSP 通用和专用优化技术、使用第三方库函数等;3)在 TS101S 系统上对解模糊、增强信噪比和超分辨算法进行调试和测试。

(3)实验结果:这里只给出最重要的超分辨算法的处理结果,如图 6(c)所示;系统关键算法的执行时间(10 次测试的平均执行时间,以下同)可参见表 2。

(4)规模预测:结合表 2 和性能指标的要求,可估算出理想状态下所需 TS101S 的数目大约为 128 片。若 8 片集成在一个处理板上,则需要大约 16 块处理板。

5.2 计算机系统上的实验测试

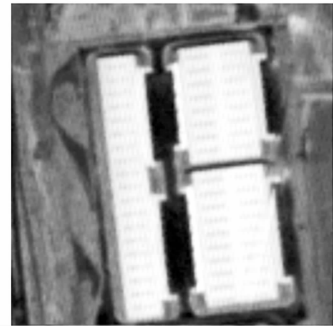
(1)实验环境:1)硬件环境:商用 PC 机,CPU 为 P4 2.4B,内存为 512M DDR333 SDRAM;2)软件环境:操作系统 Windows XP SP2,软件开发环境 Visual C++ 6.0。

(2)实验步骤:1)对算法进行适应性和鲁棒性



(a)原图

(a) Original image



(b)双线性插值后图像

(b) Bilinear interpolating image of (a)



(c)TS101S上超分辨处理后图像

(c) Super-resolution processing image of (a) on the TS101S



(d)P4 2.4B上超分辨处理后图像

(d) Super-resolution processing image of (a) on the P4 2.4B

图 6 两类系统上超分辨算法的处理效果展示

Fig. 6 Processing results of super-resolution algorithm on the two kinds of systems

表 2 两类系统上图像复原与超分辨算法的执行时间

Tab. 2 Executive time of image restoration and super-resolution algorithms on the two kinds of systems

图像大小 (pixel)	平均运行时间(s)					
	解模糊算法		增强信噪比算法		超分辨算法	
	TS101S	P4 2.4B	TS101S	P4 2.4B	TS101S	P4 2.4B
128×128	0.565	0.343	0.053	0.032	0.359	0.218
256×256	1.135	0.766	0.326	0.219	2.890	1.953
512×512	3.144	2.125	0.927	0.625	8.015	5.422
1 024×1 024	9.746	6.906	2.958	2.093	25.719	18.234

优化;2)对算法进行结构和代码优化,以消除冗余和提高性能,降低系统复杂度;3)在商用PC机上对解模糊、增强信噪比和超分辨算法进行调试和测试。

(3)实验结果:超分辨算法的处理结果如图6(d)所示,系统关键算法的执行时间见表2。

(4)规模预测:结合表2和性能指标的要求,可估算出理想状态下所需处理器数目大约为91个。若相应机群的每个计算节点拥有8个相同的处理器,则需要大约12个节点。

5.3 实验结果综合分析

由表2可绘制出如图7所示的两类系统上各

算法运行时间的对比曲线,对其进行分析可以看出:

$$T(n) \approx T_o/n + n(n_1 - 1)T_c/n_1 \approx T_o/n + nT_c. \tag{16}$$

根据 Amdahl 定律,系统的加速比

$$S(n) = \frac{T_o}{T(n)} \approx \frac{n}{1 + n^2 \frac{T_c}{T_o}}. \tag{17}$$

由式(17)、(18)可推出:

(1) 当 $T_c = 0$ 时,系统加速比最大, $S(n)_{\max} = n$,此时为单机或理想状态。实际情况下, $T_c > 0$, $S(n)_{\max} < n$ 。

(2) 若 T_o 和 T_c 已知,则当 $T(n)' = 0$, n 有最优值, $n_{\text{opt}} = \sqrt{T_o/T_c}$, $T(n)_{\min} = 2\sqrt{T_o T_c}$, $S(n)_{\max} = \sqrt{T_o/(4T_c)}$,此时系统处理速度最快。

(3) 降低 $T(n)$ 可从降低 T_o 和 T_c 两方面着手:降低 T_o 的方法是进行串行代码优化或提高处理器的性能;降低 T_c 则需要通过通信优化和并行代码优化等方法来实现。

(4) 增大 n 的最优值即提高系统可扩展能力的方法是降低 T_c 。

(5) 当 n 较小时,获得近似线性的 $S(n)$;当 n 足够大时, $S(n)$ 将停止增长且开始下滑,同时 $T(n)$ 也将停止下降开始增长。

(6) 当任务数 m 和处理器数 n 相等时,系统效率最高。

本系统中, $T_o = 2700$ s (10 000 pixel \times 10 000 pixel, 实测值), $T_c \approx 10/128 = 0.08$ s (估计值,由于胖节点内部通信较快,实际应低于此值),绘制 $T(n)$ 、 $s(n)$ 曲线如图 8 所示, n_{opt} 附近两函数的数据如表 3 所示。 $n = 184$ 时, $T(n)_{\min} = 29.394$ s $<$ 30 s, 满足要求,此时 $S(n)_{\max} = 91.856$, 并行效率 $\epsilon = 49.92\%$ 。

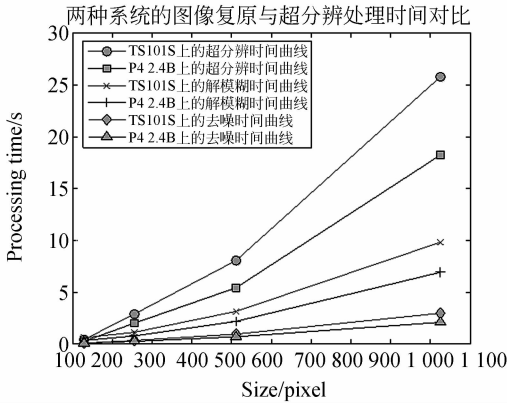


图 7 两类系统上的处理时间曲线

Fig. 7 Curves of execute time on two kinds of systems

(1) 系统内部:1)两种系统中,均是增强信噪比速度最快,解模糊次之,而超分辨算法由于复杂度最高,耗时最长(128 pixel \times 128 pixel 的图像未分块,不具代表性);2)随着图像的增大,超分辨算法运行时消耗内存大大增加,处理时间增长最快,是并行化过程中研究和分析的重点,应在保证其处理效果的同时,尽可能地加大并行化力度。

(2) 系统之间:1)图像较小时,TS101S 以 300 MHz 的频率获得了接近于 P4 2.4 GHz 的性能(两者均于 2001 年问世),验证了其执行效率较高的理论;2)在处理速度上,P4 2.4 B 由于频率较高全面领先。对两类系统处理器发展速度的分析和研究表明,DSP 芯片的发展速度要比 CPU 慢很多,会使这一差距进一步扩大;3)随着图像的增大,DSP 系统的处理时间急剧增长,说明了其处理大图像性能较弱——特别是在存储性能方面。

即使在理想条件下,使用 DSP 系统来完成任任务指标也需要至少 16 块拥有 8 个 TS101S 的处理板,系统规模很大,实现和管理均比较困难,故选择了 SMP 机群作为系统实现方式。

5.4 并行图像处理系统性能分析

在并行图像复原与超分辨处理系统中,若令 T_o 表示原始串行程序的计算时间, T_c 表示两个处理器之间通信的时间, $T(n)$ 表示并行程序执行时间, n 为总处理器个数, n_1 为各个节点内处理器个数。根据系统结构的特点,则

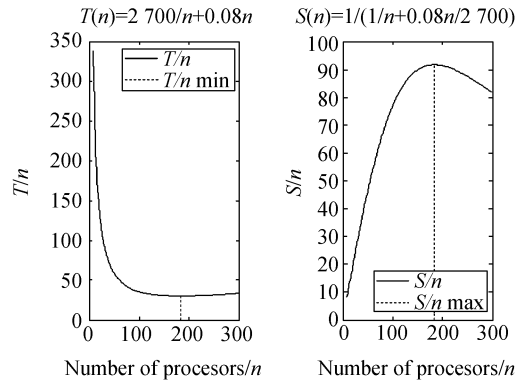


图 8 $T(n)$ 和 $S(n)$ 的曲线

Fig. 8 Curves of $T(n)$ and $S(n)$

表3 $T(n)$ 和 $S(n)$ 的部分数据Tab.3 Partial data of $T(n)$ and $S(n)$

n	$T(n)$	$S(n)$
150	30.0	90.0
182	29.392	91.852
183	29.394	91.855
184	29.394	91.856
185	29.395	91.854
186	29.396	91.849

而实际应用中,应使 $n \leq n_{opt}$,即在满足性能要求的基础上选择较小的 n 以节约成本。如本系统可选择 $n=150$,对应 $T(n)=30$ s, $S(n)=90$, $\epsilon=60\%$ 。

6 结 论

本文把大规模并行技术引入到海量图象数据的复原与超分辨处理过程中,完成了相应并行系统的设计,在保证处理效果的同时,实现了实时

处理。将图像复原与超分辨算法本身的基于像素级和邻域级操作的特点,数据正则的、几何的自然属性和处理过程中增强的可预测性(串行三要素),与胖节点的 SMP 机群体系结构、基于 PPF 结构的并行算法模型以及 MPI 和 OpenMP 的混合编程模型(并行三要素)有机地统一在一起,从而保证了设计目标的实现。实验结果表明,并行化后系统的处理速度可由 2 700 s 降到最低 29.39 s,图像对比度的改善因子 $T_e=2.61$ dB。结果表明在实际应用中应综合考虑系统性能和性价比,在满足系统性能要求的前提下,选择合适的并行规模。

7 致 谢

本文在研究过程中,得到了中科院声学所杨力和曙光公司曹振南、单志国等人的大力相助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 徐忠强,朱秀昌.超分辨率图像重建方法研究[J].自动化仪表,2006,27(11):1-4.
XU ZH Q, ZHU X CH. Study on the reconstruction methods for super-resolution image [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2006,27(11): 1-4. (in Chinese)
- [2] HUH Y, JIN S O, PARK J B. Fast image reconstruction from fan beam projections using parallel digital signal processors and special purpose processors [J]. *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, TENCON*, 1999(2):1558-1561.
- [3] RUAN ZH, HAN Y ZH, CAI H B. A dynamically partial-reconfigurable FPGA-based architecture for data processing on space solar telescope [C]. *International Symposium on Industrial Embedded Systems*, July, 4-6, 2007:194-199.
- [4] MODERSITZKI J, LUSTIG G, SCHMITT O. Elastic registration of brain images on large PC-Clusters [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2001,18(1):115-125.
- [5] DELVES L M, PRYDE G C. Parallel super-resolution of synthetic aperture radar images [C]. *IEEE Colloquium on Role of Image Processing in Defence and Military Electronics*, 2002:1-8.
- [6] 赵忠明,朱重光.遥感图象中薄云的去方法[J].环境遥感,1996,11(3):195-199.
ZHAO ZH M, ZHU CH G. Approach to removing cloud cover from satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 11(3): 195-199. (in Chinese)
- [7] DU Y, GUINDON B, CIHLAR J. Haze detection and removal in high resolution satellite image with wavelet analysis [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2002,40(1):210-217.
- [8] 周霞,张林艳,叶万辉.生态空间理论及其在生物入侵研究中的应用[J].地球科学进展,2002,17(4):588-594.
ZHOU X, ZHANG L Y, YE W H. Theory of spatial ecology and the application to the study on biological invasion [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002,17(4):588-594. (in Chinese)
- [9] CATTÉ F, LOUIS L P, MOREL J M, et al.. Image selective smoothing and edge detection by non-linear diffusion [J]. *Numerical Analysis*, 1992,29(1):182-193.
- [10] LEHTORANTA O, HAMALAINEN T, SAARINEN J. Parallel implementation of H.

- 263 encoder for CIF-sized images on quad DSP system[C]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2001(2):209-212.
- [11] 许廷发, 韦岗, 倪国强. 基于并行结构的 Gabor 小波神经网络算法及应用[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(2):247-250.
XU T F, WEI G, NI G Q. Gabor wavelet neural network algorithm based on parallel structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):247-250. (in Chinese)
- [12] 赵峰, 袁东风, 张海霞, 等. 多 DSP 图像压缩实时并行处理系统[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(9):1451-1455.
ZHAO F, YUAN D F, ZHANG H X, et al.,. Multi-DSP real-time parallel processing system for image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1451-1455. (in Chinese)
- [13] STONE C, MENON S. Large-eddy simulations on distributed shared memory clusters [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2004, 64(10):1103-1112.
- [14] 郭强, 陈桂林. 基于双 DSP 的遥感图像实时并行处理系统[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(6):547-551.
GUO Q, CHEN G L. Real-time parallel processing system for remote sensing images based on two DSPs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6):547-551. (in Chinese)
- [15] DOWNTON A, CROOKES D. Parallel architectures for image processing [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1998, 10(3):139-151.
- [16] MULYE S, WAGNER A. A mapping strategy for reconfigurable transputer networks [C]. *Proc. of World Transputer Congress*, 1995:410-421.

作者简介:



马冬冬(1980—),男,安徽阜阳人,哈尔滨工业大学电子信息与技术学院博士研究生,主要从事图象处理、超分辨技术和并行处理等方面的研究。E-mail: mymmd@yaho.com.cn



穆立胜(1975—),男,河北唐山人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事图像处理 and 超分辨技术等方面的研究。E-mail: mlsh@163.com



朱 兵(1976—),男,江苏南京人,博士,讲师,主要从事图像处理、模式识别、高精度目标识别与跟踪技术和交会对接等方面的研究。E-mail: zhub2004@163.com

导师简介:



李金宗(1940—),男,安徽砀山人,教授,博士生导师,主要从事 D3S 技术、图像处理、模式识别和交会对接等方面的研究。E-mail: jzli@hit.edu.cn