

CT 图像重建加速的几种方法^①

Research Progress on CT Image Reconstruction Acceleration

邹永宁 谭辉 黄亮 (重庆大学 ICT 研究中心 重庆 400044)

摘要: CT 图像重建速度是衡量 CT 系统的重要指标之一。论文针对滤波反投影算法综述了当前国内外的重建加速技术, 阐述了普通 PC 上的加速方法, 通过构建集群系统进行并行重建的方法, 采用多个 DSP 连接成并行计算模块的加速方法, 基于现场可编程门阵列(FPGA)的并行重建方案, 采用 GPU 图像卡实现图像重建, 采用细胞宽带引擎(CBE)的图像重建方案。在应用性能方面分析了各种加速方法的优缺点。

关键词: 计算机断层成像 图像重建 加速技术

计算机断层成像(Computed Tomography, CT)作为一种现代成像技术在医疗和工业领域中都有着广泛的应用。CT 图像重建是 CT 系统软件的重要组成部分之一, 重建速度是 CT 系统的重要指标之一。长期以来, 许多学者提出了各具特色的重建加速方法。本文列举了用于图像重建加速的各种技术, 并对它们进行了比较分析。

CT 图像重建算法多种多样, 但通常情况下采用最多的是滤波反投影算法, 因此下面只讨论此类算法的加速技术。

滤波反投影是把某一视角下测得的投影数据做一维傅里叶变换, 对上述结果乘以滤波函数 $H(\rho) = |\rho|$, 再做傅里叶反变换, 得到修正的投影数据, 然后进行反投影。将各个视角下的反投影值进行累加, 得重建后的图像^[1]。

计算时间最长的是反投影, 滤波次之, 我们主要研究这两部分的加速。有些 CT 扫描方式不同, 比如扇束 CT 和锥束 CT, 它们的滤波反投影算法有一定的差异。但是当采用相同的重建加速技术时, 其基本方法和最终效果是相似的, 我们就不细致的区分了。

1 普通 PC 上的加速技术

1.1 几何参数表法^[2]

在反投影过程中要频繁地使用三角函数, 其输入变量由射线扫描时的几何位置确定, 如果程序中直接

调用三角函数将非常耗时。因此可以在反投影前先行确定三角函数的值, 将所有计算出的值存入一张参数表中, 反投影时根据几何位置直接查参数表。采用几何参数表方法可明显地减少反投影时间, 加速比至少在 10 倍以上。这种方法不会消耗太多内存, 也不会与其他方法冲突, 在实际应用中基本上都要采用。

1.2 对称法

利用反投影算法的对称性, 只计算出部分图像数据并对称得到其它图像数据^[3]。对于扇束 CT 扫描, 具有一定关系的四幅投影的反投影运算可同时完成, 从而减少最外层循环次数到 $N/4$ (N 是投影的幅数), 这样计算量仅为原来的四分之一, 达到优化的目的^[4]。最后综合所有重建结果生成一幅完整的图像。

1.3 Intel SIMD 指令优化法

Intel 公司在奔腾系列 CPU 上相继增加了 MMX、SSE、SSE2 指令集, 其中 SSE 指令集引入了 8 个全新的 128 位 XMM 寄存器, 能够一次执行 4 个紧缩单精度浮点数操作, 同时引入了 m64 与 m128 数据之间的转换指令, 求倒数指令, 求平方根指令等。这些指令非常适合滤波和反投影这样浮点运算量大的应用场合^[5]。

Intel SIMD 指令优化技术可以使图像的重建速度提高约 5 倍。此技术适合细粒度的并行运算, 主要优化反投影和卷积循环算法的最内层代码^[6]。图 1 显示了将投影数据进行卷积的流程。优点是不需要添加任

^① 基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA04Z104)

收稿时间: 2008-09-11

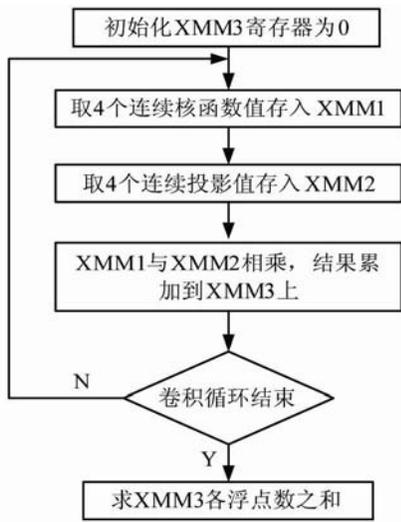


图 1 SIMD 优化卷积算法流程图

何其它硬件设备, 现在 AMD 公司生产的通用 CPU 芯片也支持此指令集。而且升级效果好, 随着 CPU 频率的提高, 不需要改变代码即可提高程序的执行速度。但这种优化的能力是有限度的, 用户不可能扩展 CPU 硬件结构, 当把 CPU 潜力挖尽时, 代码就不可能再优化了。

2 采用集群系统的并行重建

集群计算机系统由若干个独立的计算机节点, 通过高速互连系统连接而成的网络系统^[7]。集群技术逐渐成为高性能并行计算的主流技术。计算机节点可以是台式机、工作站或服务器, 其数量可以是几台也可以是成百上千台。当前专业的集群系统主要有机架式和刀片式两种架构, 一般用户也可以根据实际情况把若干台普通 PC 机连接起来组成集群系统。图 2 显示的是 IBM 公司研制的 H20 型刀片集群机, 机箱内通过千兆交换机连接了 8 块可方便拔插的刀片服务器, 一个机箱最大可扩展到 14 块刀片。

集群系统适合粗粒度的并行运算, 由于卷积和反投影程序中投影数据的相关性低, 容易把投影数据拆开分成几块运算, 所以重建的过程就是把投影数据分成几块, 分别发送到集群系统的不同节点并行计算, 最后累积各计算节点的重建结果即可。

一般来说, 集群节点数量越多重建加速比就越高, 但是当集群的通信时间占的比重较大时(比如采用前面讲的加速技术提高单节点的计算速度), 节点增加意味着通信时间的增加, 并行的效率降低。这样, 即使

滤波和反投影的时间随着节点数目的增加呈线性减少, 整个重建的效率仍会降低。文献[6]显示重建 512^2 、 1024^2 和 2048^2 大小图像分别用 2 个节点、3 个节点、4 个节点最好。



(a) 机器内连接有八个刀片服务器



(b) 拔出其中一块刀片服务器的外观

图 2 IBM H20 型刀片服务器集群

3 采用多个 DSP 的并行重建

DSP 是专门为数字信号处理而设计的, 在 DSP 采用的哈佛体系结构中, 有多个运算器, 内部有独立的总线, 取指令和取数据可以同时进行, 利用指令重叠执行的方法构成流水线处理, 当流水线处理过程建立以后, 从外部来看, 相当于每一个时钟周期取一条指令并获得一条指令的处理结果。DSP 的突出优点是高速的信号处理能力和一个指令周期内实现乘加计算, 尤其可以快速实现 FFT 算法, 如 ADSP21060 DSP 可在 0.533ms 内完成 1024 点 FFT 运算, 所以卷积阶段使用 DSP 运算是很有效的^[8]。通过平均分解反投影

任务,让多个 DSP 并行执行计算可以提高反投影的速度。DSP 电路板可以通过 PCI 接口和计算机相连,而且通过扩展 DSP 的数量可以增强系统的并行性能^[9]。相对集群系统多 DSP 系统占用的体积较小。

4 基于FPGA的重建加速技术

随着超大规模集成电路(VLSI)技术的不断发展,图像的硬件并行处理技术也得到飞速发展。现场可编程门阵列(FPGA)是一种可动态编程的器件,其优点主要在于它有很强的灵活性,即其内部的具体逻辑功能可以根据需要配置,对电路的修改和维护很方便,设计周期短,可重构,扩展性好等,特别适用于流水线方式的数据处理。

采用 FPGA 实现 CT 图像重建可利用其丰富的存储资源,使得投影数据的读取本地化,提高读取速度,解决存储器带宽限制问题,同时采用多流水线的思想实现并行计算。文献[10]中采用 FPGA 硬件实现了反投影, FPGA 架构允许在一定的内存带宽内进行并行反投影处理,并且它完成任务的速度是常规图形卡的 6 倍。所设计的系统对一个 2563 投影体数据和 60 个 5122 投影数据分别进行重建,在反投影阶段都只需要 6 秒。FPGA 有限的精度没有导致重建图像质量的降低。

内存带宽的限制是反投影过程的主要问题,处理器速度虽然以每 18 个月翻一番,内存带宽却没有适应这一变化,读取投影和图像像素数据的速度就不能加快,这样导致整体性能得不到提高,迄今为止所有硬件方法都需要解决这个问题。

5 基于GPU的重建加速技术

随着图形硬件的快速发展,如何利用硬件的可编程性和并行性来实现一些复杂计算,已成为当今的热点研究问题之一。尤其是在像素程序开始支持 32 位浮点运算和高级绘制语言不断普及之后,图形处理器(graphics processing unit,简称 GPU)逐步成为计算的主流,越来越多的研究者开始采用 GPU 来求解一些一般意义上的问题^[11]。图 3 显示了 GPU 的基本结构, GPU 内部的顶点和片断部分被设计成可编程单元,可编程顶点处理器是一个可以运行 Cg(C for graphics) 顶点程序的硬件单元,而可编程片断处理器是一个可以运行 Cg 片断程序的单元^[12]。

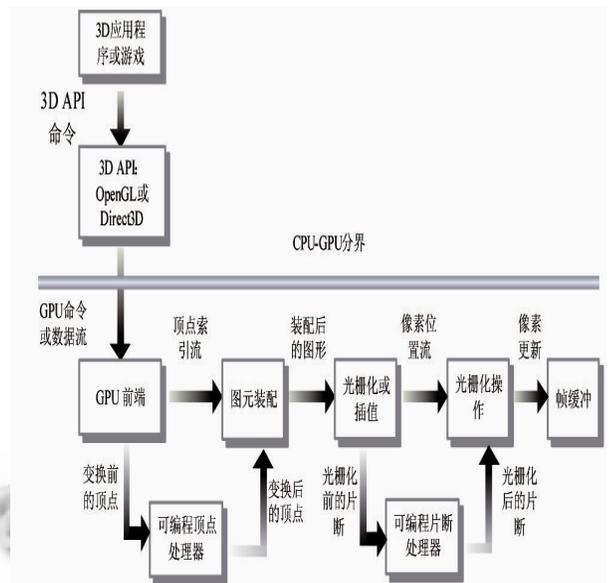


图 3 可编程图形流水线

文献[13]分析了 T-FDK 算法的运算特点和反投影方式,利用通用显卡的高精度、可编程等特性实现了 T-FDK 快速重建算法,重建加速比达到 27.6 倍。文献[14]应用 GPU 实现了单圆锥束扫描 FDK 重建算法,重建 2563 耗时 2-3 秒,5123 耗时 35-40 秒,10243 耗时 18.5 分钟,加速比达到了 30-40 倍。对其他扫描方式也至少可以提高 10 倍。

GPU 实现反投影过程可以获得较大的加速比,实现卷积过程时 GPU 同样表现出色。针对图像滤波的卷积和 FFT 算法,文献[15]提出了采用 GPU 实现的方法,实验结果表明 GPU 执行卷积和 FFT 的性能都超过了 CPU,其中卷积的效果好于 FFT。

6 基于CBE的重建加速技术

前面讲过由于存储带宽的限制导致反投影时间很长,最近,IBM 为分布计算开发了一种优化的新颖通用目标架构,即细胞宽带引擎(CBE)。它有 8 个协处理器(SPEs),理论上可以实现 192Gflops 的运算(3GHz, 8 个单元, 4 个浮点数每矢量, 2 条指令, 一次乘法, 每个时钟周期)。每个 SPE 有 256KB 本地存储单元,并且在自己的地址空间内以 3.2GHz 的频率运行。使用仿真平行扇束数据,每秒可以反投影 330 幅 512 大小的投影,可以达到 10 倍的加速比^[16]。处理器内部结构如图 4 所示。

文献[17]介绍了两个 CBE 系统:一个专业系统:

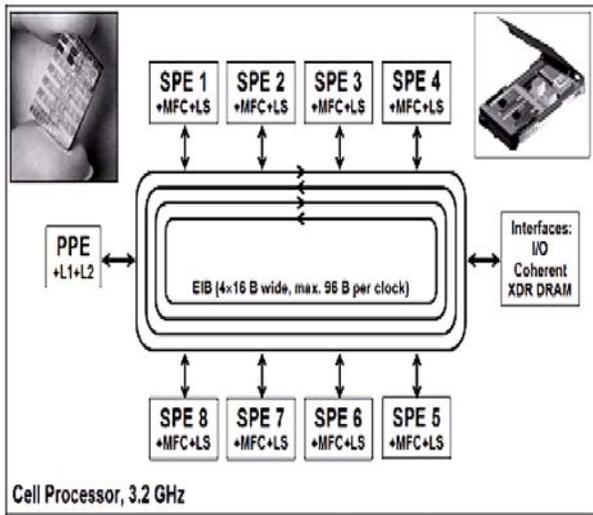


图 4 细胞宽带引擎处理器

双细胞装置系统(DCBS), 和一个游戏系统:由四个索尼公司的 PS3 组成的集群。使用双细胞装置系统和 PS3 集群进行锥束重建实验, 两种结构每秒都可以处理多达 30 个 5122 的投影数据并以 32 位的浮点精度反投影到 5123 的像素体上。由于内存的限制, PS3 不适合大尺寸的图像重建和迭代算法, 完成如此复杂的任务需要象 DCBS 这样专业一点的硬件。

7 结论

CT 图像重建的加速一直是工程和研究人员的积极探索的目标, 本文根据不同硬件平台综述了滤波反投影算法的加速技术, 分析了各平台的特点以及实现重建加速的方法。根据比较可以看出所有的技术方法都各具特色, 在具体实现时如果综合几种方法一起使用, 就可以达到更大的加速比。由于超大规模集成电路在不断地发展, 新的硬件层出不穷, 在继承原有的加速技术的同时, 有必要跟随硬件的发展去探索新思路新方法, 推动重建加速技术的进步。

参考文献

- 1 庄天戈. CT 原理与算法. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- 2 张朝宗, 郭志平, 董宇峰, 张和平. 用几何参数表方法实现快速重建 CT 图象. 清华大学学报, 1998, 38(7): 47-49.
- 3 江根苗, 连兵. CT 图象重建的算法优化和代码优化. CT 理论与应用研究, 2000, 9(增刊): 13-22.

- 4 傅健, 路宏年. 扇束工业 CT 滤波反投影重建算法的快速实现. 计算机应用研究, 2003, (3): 51-53.
- 5 Intel Corp. Intel architecture optimization reference manual. Intel Corp. 2004 <http://developer.intel.com/>.
- 6 邹永宁, 王珏, 卢艳平. 扇束工业 CT 图像重建算法的并行实现. 计算机工程与应用, 2007, 43(25): 218-220.
- 7 唐瑞春, 马群生, 丁萌. 一种高速集群计算机互连系统的设计. 高性能计算技术, 2003, (2): 22-26.
- 8 王春海, 肖斌. ICT 图像重建并行处理技术简介. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 55-57.
- 9 陈雪松. CT 图像的可扩展多 DSP 并行计算系统结构. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(3): 330-333.
- 10 Dzmity Stsepankou. Real-Time 3D Cone Beam Reconstruction. 2004 IEEE: 3648-3652.
- 11 柳有权, 刘学慧, 吴恩华. 基于 GPU 带有复杂边界的三维实时流体模拟. 软件学报, 2006, 17(3): 568-576.
- 12 Fernando R, Kilgard MJ. The Cg Tutorial -The Definitive Guide to Programmable Real-Time Graphics. Addison Wesley, 2003.
- 13 戴智晟, 陈志强, 邢宇翔, 张丽, 毕文元. 用通用显卡加速三维锥束 T-FDK 重建算法. 清华大学学报, 2006, 46(9): 1589-1592.
- 14 Zhao X. GPU-based 3D cone-beam CT image reconstruction: application to micro CT. Nuclear Science Symposium Conference Record, 2007: 3922-3925.
- 15 Ondřej Fialka, Martin Čadík. FFT and Convolution Performance in Image Filtering on GPU. Proceedings of the Information Visualization (IV'06), 2006.
- 16 Kachelrieß M. Hyperfast Parallel-Beam Backprojection. Nuclear Science Symposium Conference Record, 2006: 3111-3114.
- 17 Knaup M, Kachelrieß M. Real-Time Cone-Beam CT Image Reconstruction using a Mercury's Dual Cell-Based System (DCBS) and a Sony's Playstation 3 (PS3) Cluster. Nuclear Science Symposium Conference Record, 2007: 3926-3928.