

一种基于 SIMD 技术的快速并行代数重建算法

刘 远 张定华 赵歆波 毛海鹏 刘晓鹏

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要 代数重建算法是解决非完全投影数据重建的有效方法,尤其在对于超出探测器尺寸范围的大型零件的无损检测中已成为最有力的关键技术,但以往算法计算量较大、耗时较长。为了快速地进行代数重建,提出了一种基于 Intel 处理器单指令多数据(single instruction multiple data, SIMD)技术^[2]的快速并行算法,并在充分分析代数重建公式特点的基础上,设计了一套便于并行化运算的数据结构及计算流程,其在运算中可一次性加载多个打包数据,利用 MMX(multimedia extension)、SSE(streaming SIMD extension)和 SSE2 指令完成 SIMD 方式计算。通过仿真实验证明,该算法在达到同样精度的前提下,不仅提高了重建速度(加速比 4 倍),解决了传统代数重建算法运算速度慢的瓶颈问题,并且能够较好地重建部分数据缺失的投影图像,该算法对于航空航天大型零部件的无损检测具有重要的理论意义及工程应用价值。

关键词 CT 代数重建 单指令多数据并行运算 SSE 和 SSE2 指令

中图分类号: TP391.72 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)01-0073-05

A Rapid Parellel ART Based on SIMD Technology

LIU Yuan, ZHANG Ding-hua, ZHAO Xin-bo, MAO Hai-peng, LIU Xiao-peng

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Algebraic reconstruction method(ART) is an effective approach to reconstruction of incomplete projection data and a most powerful key technology especially in nondestructive detection of parts of aircraft and spacecraft which are larger than the size of CT detector. However, former procedures have huge amount of computation and are extremely time-consuming. In order to improve these disadvantages, this paper brings forward a rapid parellel algebraic reconstruction procedure based on SIMD technology of Intel central process units. Having maturely comprehended the feature of ART formula, this novel procedure designs a set of data structures convenient for parallel computation and a procedure pipeline to load a number of packed data in one time and to complete reconstruction computation in SIMD method by MMX, SSE and SSE2 instructions. Proved by the simulating experiment, this method promotes the speed about 4 times with the same precision of ordinary procedures, and solves the bottle-neck problem of traditional ART procedures, which possesses important engineering applicational value of nondestructive detection for large parts of aircrafts and spacecrafts.

Keywords computed tomography(CT), algebraic reconstruction technique(ART), SIMD parellel computation, SSE and SSE2 instructions

1 引 言

投影重建是利用投影图像获取截面形状的图像处理技术,也是 CT(computed tomography)系统的关

键环节,因为其直接影响到 CT 系统工作效率和输出图像的质量。本文将对代数重建算法(algebraic reconstruction techniques, ART)的并行优化方法进行讨论。

代数重建算法是投影重建的典型方式之一,相

基金项目:国家自然科学基金项目(50375126)

收稿日期:2005-07-21;改回日期:2006-01-25

第一作者简介:刘远(1980~),男。2006年4月获得西北工业大学工学硕士学位。主要研究方向为工业 CT 理论及计算机图形/图像处理,在核心期刊发表论文 3 篇。E-mail: Paladinrick@hotmail.com

比传统的变换法(如滤波反投影),其优点是可以针对非完全投影进行重建^[1],不仅重建图像的密度分辨率比较高,且抗噪声干扰能力强,另外,还可以利用重建对象的先验知识来减少计算量和重建范围,以提高效率;但算法的运算量、存储量较大,重建速度慢,已成为制约 ART 实用性的瓶颈^[2]。

本文将介绍一种利用 Intel 处理器单指令多数据并行运算方式,基于 MMX, SSE 和 SSE2 指令集的并行快速代数重建算法。该算法不仅显著提高了重建速度,而且在保证重建质量的前提下,较好地解决了非完全投影重建问题,其对于航空航天器大型零件的无损检测具有重要的工程应用价值。

2 SIMD 指令级并行运算方式

Intel 主流处理器的单指令多数据(single instruction multiple data, SIMD)指令集(包括 MMX、SSE 和 SSE2)是计算机指令级并行运算的典型方式和有力工具之一,利用 MMX 和 XMM 寄存器,对打包数据(packaged data)进行单指令多数据操作,如图 1 所示。

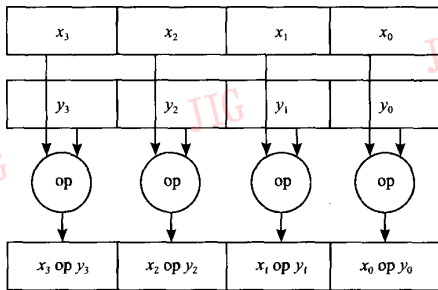


图 1 单指令多数据运算方式

Fig. 1 Computation pattern of SIMD

MMX 和 XMM 寄存器是 Intel 公司在 Pentium 系列处理器发展历程中先后推出的关键架构,在物理上分别是 8 个 64bits 和 128bits 的浮点数寄存器,图 1 就是两个 128bits 的 XMM 寄存器之间的 SIMD 运算,结果存入第 3 个 XMM 寄存器中,每个数据占据 32bits 长度。这种结构及相关指令不但极大地提高了计算机浮点数并行运算能力,同时增强了 CPU 高速缓存和计算机内存的管理能力,这就为现代 PC 向多媒体处理方向发展提供了硬件支持^[2]。

投影图像重建,实际上可看作是一种数据流处理过程,尤其是代数重建方法,其虽涉及到大量的浮

点数计算,但由于计算步骤相对简单,因此采用单指令多数据的计算方式将大大提高重建速度^[3]。

3 并行投影算法

ART 算法迭代公式的标量形式如下:

$$f_j^{(k+1)} = f_n^{(k)} + \lambda \frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_{i,n} f_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_{i,n}^2} w_{i,j} \quad (1)$$

此公式是按照当前射线遍历顺序计算像素值的:其中 $f_j^{(k)}$ 表示当前射线所遍历的第 j 个像素值在第 k 次迭代中的临时结果; λ 是松弛因子,用以控制迭代的收敛过程; p_i 是第 i 条射线的投影积分值, $w_{i,n}$ 是权因子,表示第 i 条射线穿过第 n 个像素时的长度。

按照 ART 公式的迭代步骤,首先需要计算每个角度下每条射线穿过各个像素时的截距,作为迭代公式中的权重 $w_{i,n}$,同时还要累加计算每条射线的线积分值作为当前投影值。对于 $N \times N$ 大小的切片图像,前向投影需要涉及到 N^3 数量级的像素网格截距计算。此过程称之为前向投影(forward projection),是重建迭代中最为耗时的环节。

如图 2 所示,计算每个像素网格对于射线的截距过程,实际上是计算机图形学中正方形对于直线的裁减计算^[4]。不管是扇形束还是平行束重建,由于虚拟的 X 射线源和探测器都位于重建区域之外,因此省去了裁减过程中的可见性判断,只需要用网格 4 条边分别对射线进行交点计算,再判断交点是否位于网格区域之内即可,而且不同的射线的投影计算是独立的。由此可见,在投影计算过程中可以很方便地设计出适合 SIMD 并行运算方式的打包数据结构。

具体地说,XMM 寄存器一次性存储 4 个 float 型浮点数,正好可以将网格的 4 条边界坐标值放入其中,再将当前射线的原点坐标和向量分量值按照某种顺序存入到另一个 XMM 寄存器中,利用图 1 所示的单指令多数据运算方式,就可以将 4 个交点的坐标值一次性求出了。例如:如果射线源坐标为 (X_0, Y_0) ,当前射线向量为 (V_x, V_y) ,网格左右上下边界坐标为 $(X_{left}, X_{right}, Y_{bottom}, Y_{top})$,那么计算得到的射线与左边界交点的 y 坐标为 $y_{left} = (X_{left} - X_0) \times V_y / V_x + Y_0$,由于其他 3 条边交点的公式计算符号是

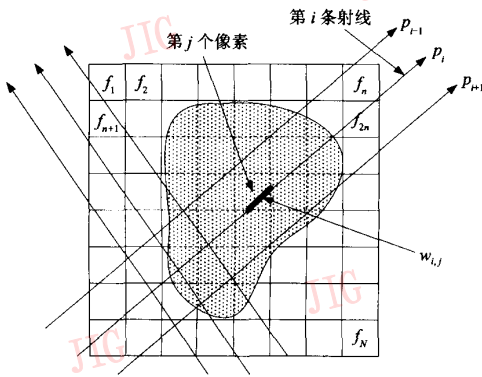


图 2 像素网格求交
Fig. 2 Intersections of pixel grid

完全一致的,因此可以设计出符合 SIMD 运算格式运算流程。在计算出 4 个交点之后,还需要判断哪些交点位于四边形的边界上,只需要将左右边上交点的纵坐标和上下边上交点的横坐标打包存入 XMM 寄存器中,与边界向量进行一次比较,就可以得出最终的网格交点(如图 3 所示)。

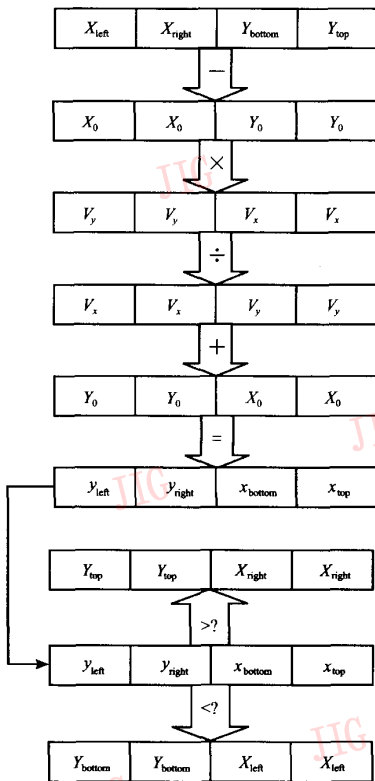


图 3 并行投影算法数据流程
Fig. 3 Pipeline of parallel projection

由于每个 XMM 寄存器的长度为 128bits,图 3 中每格数据长度为 32bits,完全满足投影计算所需的浮点数长度,不需要进行额外的进位运算,因此根据这种结构设计算法流程,就可以充分利用单指令多数据指令的优点进行并行运算,由于其避免了串行算法中大量的判断分支结构,从而大大提高了投影计算的速度^[2]。

4 加速迭代技术

除了上面所描述的并行方法之外,在迭代过程的几个步骤中可以用到几种加速技术,对于提高速度也起到了较大的作用。

射线与重建区域网格相交的计算结果不会因重建物体的形状结构而改变,由于公式中(1)的 w_i 值不是像素 f 的函数,因此可以利用重建区域(一般为圆形)的对称性来减少计算量,即只需要计算扫描角度从 0° 到 90° 的射线投影即可^[5]。

此外,由于射线所经过像素的坐标序列、与每个像素的截距和以及总线积分值与重建对象的结构无关,因此只需在迭代之前进行一次前向投影计算,就可以记录下每个角度下每条射线的上述参数。这样在以后的迭代过程中就免去了重新计算投影的过程,从而大大提高了迭代的速度和效率^[4]。

在 ART 公式中,经过前向投影计算之后,线积分 $\sum_{n=1}^N w_{i,n} f_n^{(k)}$ 可以采用一次计算 4 个像素的 SIMD 运算方式,由于减少了循环中的分支预测和运算次数,从而提高了计算效率和迭代的速度。

由于在同一个角度下的不同射线之间的迭代是互相独立的,而且迭代的计算步骤也是一致的,因此可以在计算中一次性加载 4 条射线,同时进行迭代,这也是并行化迭代算法的核心步骤。

以上所述就是迭代过程中应用并行算法的几处关键技术,而且都有与之对应的符合 SIMD 并行运算方式的数据结构,在此限于篇幅不作赘述。

5 算法步骤

并行代数重建算法的步骤如下:

- (1) 加载重建对象的投影图像,初始化各内存变量和寄存器;
- (2) 进行并行化前向投影计算,对当前射线利

用 SIMD 指令进行像素网格的求交运算；

(3) 根据迭代方式, 计算并记录射线投影过程中的各参数；

(4) 利用 SIMD 方式加载当前角度下的多条射线, 进行并行迭代计算；

(5) 迭代完毕后, 判断迭代前后的重建图像误差, 若小于给定的阈值, 则重建结束, 否则进行下一次迭代；

(6) 输出图像, 释放内存, 还原各寄存器, 程序结束。

6 实验与分析

图 4(a) 分别是两种零件的真实切片图像, 图 4(b) 是等像素间隔扇形束并行 ART 算法的重建结果, 图 4(c) 是缺少一半投影数据的扇形束重建结果, 曲线图为重建图像中间剖线的灰度分布。其中第 1 种零件的两种材质均匀分布, 而后一种零件为仿真功能梯度材料, 结构上是 $\phi 60$ 的简单轴。材料分布设计过程是, 先选取轴的中心线为参考特征, 然

后以零件上各点到中心的距离 r 为变量做线性功能梯度材料分布设计, 同时由于中间孔洞的分布避免了在空间位置上的中心对称, 因此可以此来检验算法对于材质分布不均和投影数据缺失零件的重建能力。

以上实验图像大小为 256×256 , 采用普通 ART 算法, 松弛因子为 0.2, 迭代次数 3 次。

表 1 中误差分析公式为^[2]

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|f_i - \hat{f}_i|}{f_i} \times 100\% \quad (2)$$

其中, f_i 为原图像像素的灰度值, \hat{f}_i 为重建图像像素的灰度值。

图 5 是本实验室 CT 检测典型对象——航空发动机涡轮叶片叶身部分的真实剖面图像和本算法重建结果的对比效果。通过工程实际检验, 本算法完全能够在满足工业 CT 无损检测的精度要求。

从以上结果可以看到, 根据逐像素与原切片图像比较所得出的计算结果说明, 并行化 ART 算法的重建精度能够达到普通 ART 算法的水平, 但在速度上却大大超过了普通 ART 算法, 加速比达到 4 倍；

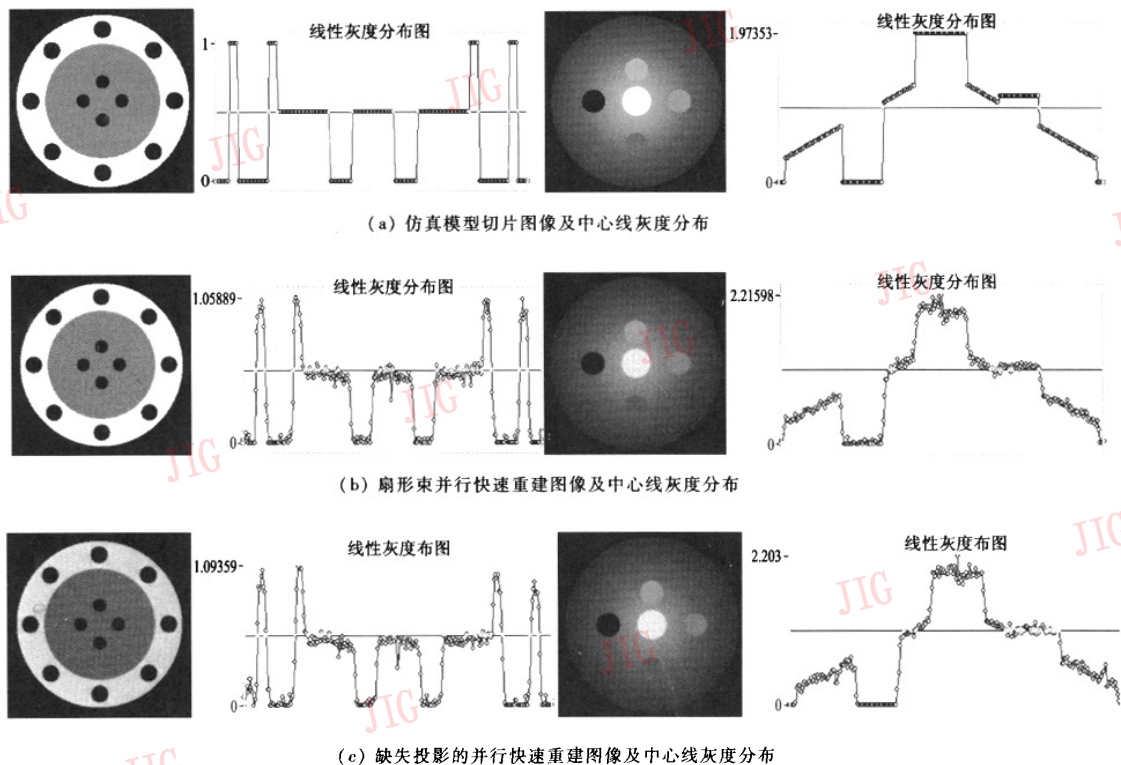


图 4 重建结果图

Fig. 4 Results of reconstruction

表 1 算法的时间和误差

Tab.1 Time costs and errors of algorithm

	普通扇形束 ART		并行扇形束 ART		非完全投影 ART	
时间(s)	39.84	41.43	10.12	10.45	12.54	12.86
误差(%)	5.41	5.28	5.41	5.28	7.52	7.36

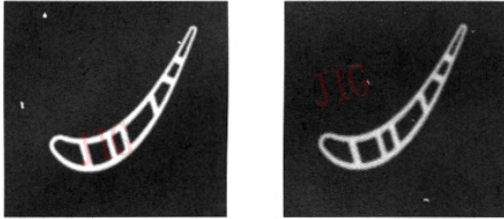


图 5 叶片真实剖面及重建图像对比

Fig.5 Comparison between real section and reconstruction slice of blade

相比传统 Feldkamp 滤波反投影算法,ART 算法不仅可以解决投影缺失的问题,且误差也在工程允许的范围之内。

7 结 论

本文提出的并行化 ART 重建算法,是利用 SIMD 并行指令及其他多种加速技巧,在保证精度的前提下,大大提高了传统代数重建算法的速度和效率,从而解决了影响 ART 算法实用性的瓶颈问题,

其将成为航空航天大型零部件无损检测领域中的重要技术手段。

参考文献 (References)

- 1 Tam K C, Eberhard J W, Mitchell K W. Incomplete-data CT image reconstructions in industrial applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1990, 37(3): 1490 ~ 1499.
- 2 IA-32 Intel. Architecture Software Developer's Manual[EB/OL]. <http://www.Intel.com,2004-08-16/2004-12-07>.
- 3 Yan Yang, Allen Tannenbaum, Don Giddens. Knowledge-based 3D segmentation and reconstruction of coronary arteries using CT images [A]. In: Proceedings of International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology EMBC [C], 2004, 26 III: 1664 ~ 1666.
- 4 Li Chun-fang, Zhang Xin-feng. Modified simultaneous algebraic reconstruction technique and its application in CT from limited range [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(7): 726 ~ 729. [李春芳, 张新峰. 改进的联合代数重建法及其有限角投影重建[J]. 光电子·激光, 2002, 3(7): 726 ~ 729.]
- 5 Shi Du-fang. CT projection reconstruction technology with minor projections in limited angles [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(2): 168 ~ 172. [是度芳. 有限角 CT 少数投影重建图象技术[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 168 ~ 172.]
- 6 Sun Xiao-an, Chen Shu-zhen, Wu Zhi-bin, et al. The optimal method of image reconstruction[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4A(2): 105 ~ 109. [孙晓安, 陈淑珍, 吴志斌等. 图象重建中的最优化方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4A(2): 105 ~ 109.]