

基于蒙特卡洛的医学图像重建体积计算算法GPU加速研究

何冬林, 勾成俊, 文玉梅, 陈昭, 雷琴, 杨鹏, 吴章文

四川大学原子核科学技术研究所/辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064

【摘要】目的:确定基于蒙特卡洛算法计算体积的精度及提高其速度,为医学图像的应用领域快速提供可靠的数据。**方法:**在FonicsPlan计划系统平台上,实现基于蒙特卡洛方法的体积计算,并使用C++AMP对算法做GPU并行加速,然后对体积计算结果在精度和速度上进行比较分析。**结果:**与像素累加法、体元累加法相比,蒙特卡洛算法的准确性最高但其算法用时也最长。通过充分利用计算机的显卡计算性能,可将计算速度平均提高50倍。**结论:**经GPU加速后的蒙特卡洛算法在计算体积的速度和精度两方面都能满足临床要求,在医学图像处理及临床诊疗具有较高的应用价值。

【关键词】蒙特卡洛算法;体积测量;C++AMP;GPU加速

【中图分类号】R811

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)03-0260-05

GPU acceleration for Monte Carlo algorithm-based volume calculation of medical image reconstruction model

HE Donglin, GOU Chengjun, WEN Yumei, CHEN Zhao, LEI Qin, YANG Peng, WU Zhangwen

Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: Objective To ascertain the accuracy and improve the speed of Monte Carlo (MC) algorithm for volume calculation and provide reliable data for the clinical application of MC algorithm with GPU acceleration. **Methods** MC algorithm-based volume calculation was implemented on FonicsPlan planning system platform, meanwhile, C++ accelerated massive parallelism was applied to MC algorithm for parallel GPU acceleration. The accuracy and the speed of algorithms for volume calculation were compared and analyzed. **Results** Compared with pixel accumulation method and voxel accumulation method, MC algorithm has the highest accuracy and the longest elapsed time. The speed of MC was substantially increased to an average of 50 times by making full use of GPU performance. **Conclusion** The MC algorithm with GPU acceleration for volume calculation has a highly application value on medical image process and the clinical diagnosis and treatment for it achieves a higher accuracy and reduces elapsed time, which meets the clinical requirements.

Keywords: Monte Carlo algorithm; volume calculation; C++ accelerated massive parallelism; GPU acceleration

前言

随着医学图像可视化技术在图像配准、三维重建等领域中的大量应用,三维测量数据和立体图像技术也成为了临床诊断与治疗的重要依据与手段^[1-3]。体积是三维重建模型的重要几何属性,医生通过分析病变区域和危及器官的体积数据,可以

更精确地制定治疗方案。肿瘤放疗、治疗后评价等都需要较准确的组织器官的体积数据^[4-5]。因此,对感兴趣区体积的有效计算,成为医学图像处理领域的重要问题。体元累加法以及基于二维图像来计算模型体积的像素累加法等广泛应用于模型体积计算领域。此外,蒙特卡洛方法也已被国外学者们应用于模型体积测量的研究。本文在FonicsPlan计划系统的平台上实现上述3种体积计算算法,对算法的准确性和计算速度进行比较分析,并对蒙特卡洛算法进行GPU并行加速。

1 材料与方法

1.1 医学图像处理

【收稿日期】2017-12-25

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0105103)

【作者简介】何冬林,硕士研究生,研究方向:辐射物理与医学物理,E-mail: he-donglin@foxmail.com

【通信作者】吴章文,研究员,研究方向:辐射物理与医学物理,E-mail: wuzhangwen@scu.edu.cn

将运用CT、MRI等成像设备得到基于DICOM标准的人体断层二维图像序列导入到放射治疗计划系统中。随着精确放疗技术的发展,放疗医师通过CT/MRI或CT/PET图像融合精准勾画靶区^[6],形成有序的轮廓点集。通过三维重建的方法来重建物体的表面,形成只有表面三角网格的模型。获取物体表面顶点(Vertex)和其法向量,为蒙特卡洛算法的实现提供数据准备。该法向量为相接几个三角面单位法向量的平均值。该过程如图1~3所示。

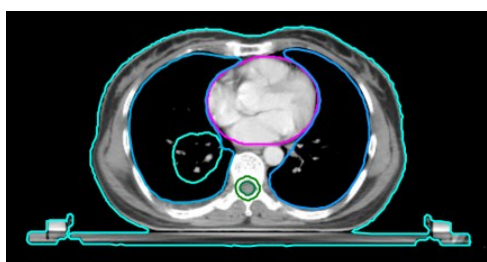


图1 器官轮廓勾画

Fig.1 Organ contour delineation

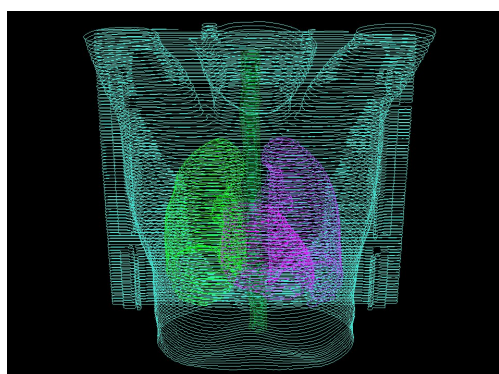


图2 三维重建线框显示

Fig.2 Three-dimensional reconstruction wire display

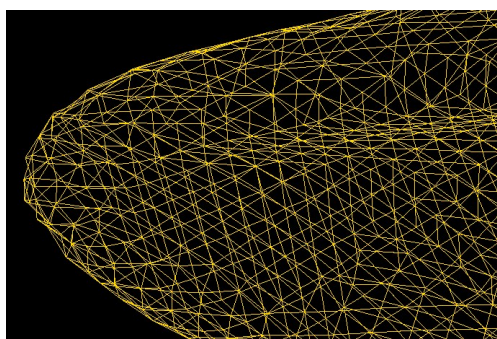


图3 表面三角网格模型

Fig.3 Surface triangular mesh model

1.2 蒙特卡洛算法

蒙特卡洛方法是以概率统计理论为基础的数值计算方法。其应用在计算医学图像体积领域的主要

步骤是:首先在该重建模型外面生成一个长方体包围盒,包围盒边界由模型在X、Y、Z 3个坐标轴方向的最大和最小点坐标来确定^[3]。然后在包围盒内生成一系列随机点,则模型的体积可由下面公式表示:

$$V_{obj} = V_{box} \times \frac{Np_{in}}{Np_{all}} \quad (1)$$

其中, V_{box} 指包围盒体积, V_{obj} 为该重建模型体积的计算值, Np_{in} 为模型内随机点的数量, Np_{all} 为包围盒内全部随机点的数量。由此可见,实现该方法最关键的是如何准确判断一个随机点在重建模型的内部还是外部。根据文献^[7],可由图4所示原理做判断。

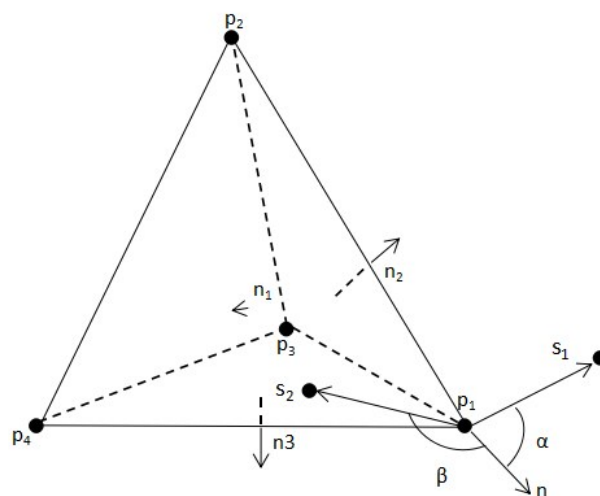


图4 随机点位于模型内外的位置判断

Fig.4 Location determination of random points inside or outside the model

如图4所示, p_1 为三角面片的一个顶点, s_2 、 s_1 分别是模型内、外的两个点。 s_1 与整个模型中所有顶点最短距离为 s_1p_1 , s_2 与整个模型中所有顶点最短距离为 s_2p_1 。由向量内积公式可知,如果向量 $\overrightarrow{p_1s_1} \cdot \vec{n} \geq 0$,则两个向量夹角为 $0^\circ \sim 90^\circ$,点 s_1 在模型外部;反之,向量 $\overrightarrow{p_1s_2} \cdot \vec{n} < 0$,则两向量夹角为 $90^\circ \sim 180^\circ$,点 s_2 在模型内部^[8]。文献^[9]指出文献^[7]的方法在处理 s_1p_1 很小的情况下可能会产生错误。刘玉身等^[8]提出增强的内外分类方法来纠正少量的分类错误。即当 $\overrightarrow{p_1s_2} \cdot \vec{n} < 0$ 时,找到第二个近邻点,如果其内积大于0则位于外部,否则位于模型内部。

1.3 C++AMP

C++AMP 是微软于2012年2月在 GoingNative 大会上正式发布的开放规范。它致力于降低在由CPU和GPU共同组成的异构硬件平台进行数据并行编程的难度^[10]。VS2012增加了新的工具和功能支持调试C++AMP应用程序,如GPU调试、智能感知、

性能剖析和GPU并行可视化。这使得主流C++程序员能够通过惯用的工具来开发的改动小,具有可移植性的应用程序,尤其对于适合数据并行计算的代码,能够实现明显加速^[11]。C++AMP不仅可使程序在所有支持DirectX 11显卡的计算机上工作,而且还是通用不过时的。它不只是一个GPU解决方案,还是一个有效将数据并行算法跨平台支持异构计算的解决方案^[12]。和CUDA、OpenCL更接近硬件底层相比,C++AMP降低了异构编程的实现难度,使得异构编程变得容易且不会只限于特定的供应商或显卡系列^[13]。

C++AMP编程模型包括多维数组、索引类、array和array_view类的内存传输模式以及数学函数库。应用程序的串行部分是由CPU线程控制、适宜并行的部分由parallel_for_each函数作详细的线程设置、由核函数完成核心计算任务以及数据的隐式拷贝等^[14-15]。借助可编程GPU高速缓存,C++AMP能大幅减少数据在内存中的读写时间,可把应用程序的性能提升更高^[16]。

2 结果与讨论

2.1 算法准确性验证

本研究选用Stanford大学的Bunny(图5)、Buddha(图6)、Dragon(图7)模型来验证蒙特卡洛算法的准确性。将3个模型数据导入到FonicsPlan系统中。模型及横断面显示如图5~图10所示。

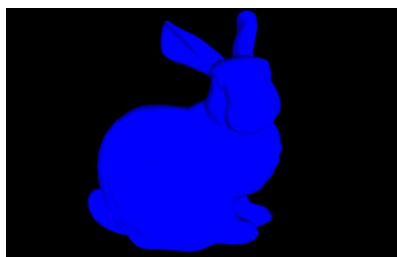


图5 Bunny模型
Fig.5 Bunny model



图6 Buddha模型
Fig.6 Buddha model

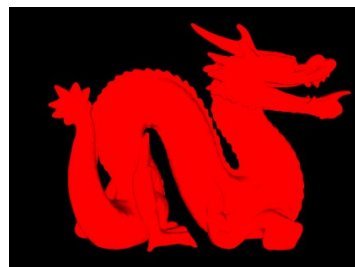


图7 Dragon模型
Fig.7 Dragon model

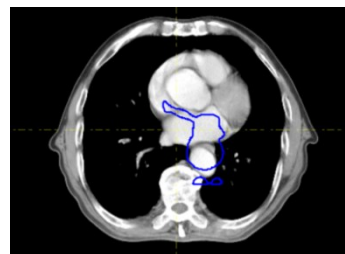


图8 Bunny横断面轮廓
Fig.8 Bunny transverse contour

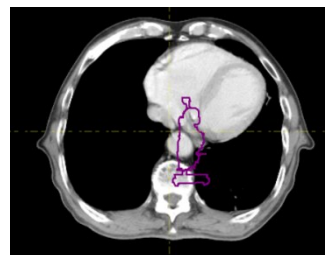


图9 Buddha横断面轮廓
Fig.9 Buddha transverse contour



图10 Dragon横断面轮廓
Fig.10 Dragon transverse contour

3个模型的体积以3dsmax计算的体积数据作为真实值(Bunny: 201.80 cc; Buddha: 155.75 cc; Dragon: 44.67 cc)。分别实现并获取像素累加法(Pixel)、体元累加法(Voxel)以及蒙特卡洛算法对以上模型的体积计算结果和时长,其中蒙特卡洛算法的随机点数目设置为包围盒内20个/cc,结果如表1所示。

表1 3种体积计算算法的结果

Tab.1 Results of 3 kinds of methods for volume calculation

Models	Methods	Volume/cc	Relative error/%	Elapsed time/ms
Bunny	Pixel	211.891	5.000	858.244
	Voxel	198.359	-1.705	555.369
	MC	200.458	-0.665	2 592.590
Buddha	Pixel	897.798	9.719	897.798
	Voxel	151.516	-2.718	557.566
	MC	153.902	-1.187	3 272.780
Dragon	Pixel	49.996	11.923	939.923
	Voxel	43.063	-3.599	559.759
	MC	44.981	0.696	609.961

MC: Monte Carlo

由表中数据可以看出,在计算准确性上,体元累加法和像素累加法对于计算形状过于不规则,棱角较多模型误差较大。而蒙特卡洛算法的相对误差较小,约为1%左右,具有较大优势。并且理论上随着随机点数目的增加,蒙卡算法的计算精度可进一步提高。在计算速度上,体元累加法、像素累加法、蒙特卡洛法3个模型的总时长分别为1.673、2.695、6.475 s。相比之下,蒙卡算法用时最长。在临床使用上计算速度显得过于缓慢,通过充分利用显卡的高性能并行计算对蒙特卡洛算法加速可解决这一问题。

2.2 蒙卡算法的GPU加速

我们使用C++AMP在visual studio 2013环境下实现蒙卡算法,将程序在GPU NVIDIA GeForce GTX1060, Intel(R) Core(TM)i5-4570 CPU @ 3.20 GHz 3.20 GHz的PC机上运行。

本文以5套临床肿瘤病例的RT Struct来测试算法的加速效果和临床表现,其中包括头颈部1套、胸腹部3套、盆腔部1套。选取其中包络盒大小明显不同的结构以及整套病例来分别分析加速算法的表现,如表2所示。

表2 算法用时及GPU加速比列表

Tab.2 Elapsed time and GPU speed-up ratio

Structures	Structure volume	Random points	Contour vertex	Pixel/ms	Voxel/ms	MC/ms	AMP_MC/ms	Speed-up ratio
Head 1	10 556.50	6.12E+5	10 932	9 464.77	7 908.63	14 481.33	420.75	34.42
Pelvic 1	24 217.54	7.61E+5	11 960	5 529.36	3 590.36	23 106.23	484.76	47.67
Chest 1	42 311.33	2.12E+6	30 782	17 589.09	9 495.44	55 877.90	1 110.20	50.33
Chest 2	50 942.13	2.37E+6	35 946	15 189.97	7 899.47	97 844.96	1 613.10	60.65
Chest 3	59 182.72	2.82E+6	37 971	13 650.57	8 080.55	129 651.59	2 139.46	60.60
Brain stem	25.26	9.59E+2	99	741.39	358.97	0.57	2.41	0.24
Mandible	55.38	6.08E+3	420	804.88	364.39	6.73	3.55	1.90
Heart	610.54	2.50E+4	1 049	783.04	525.12	88.07	13.06	6.75
Ring	356.75	2.52E+4	937	1 156.70	542.09	65.09	6.67	9.75
Lung_left	1 022.52	6.95E+4	1 216	561.07	513.71	478.70	35.78	13.38
Lung_left2	1 532.28	8.86E+4	1 427	530.04	470.97	818.27	48.60	16.84
H_Body	9 874.76	5.58E+5	6 383	369.34	314.87	14 397.30	380.63	37.83
Lung	3 733.97	2.14E+5	3 301	1 251.81	587.23	2 756.40	65.78	41.91
P_Body	23 324.70	7.14E+5	8 219	431.26	372.09	23 020.20	457.81	50.29
C_Body	27 941.70	1.20E+6	13 404	1 148.65	602.95	61 249.70	897.44	68.25

AMP_MC: MC method accelerated by accelerated massive parallelism; H_Body: The external of head; P_Body: The external of pelvic cavity; C_Body: The external of chest; The data of structure volume obtained by AMP_MC method were from different clinical cases.

经C++AMP加速后的蒙卡算法(AMP_MC)在5个病例的测试中,平均能获得50倍的加速比,用时最长2.14 s,远少于加速前的129.7 s,与体元累加法和像素累加法相比,算法速度上也具有较大优势。对于具体的不同器官,加速比差异较大。AMP_MC方法的并行计算部分所占比重与器官体积大小(即随机点的数量)和轮廓顶点数量有关,所以体积很小的器官,因串行算法部分所占比重较大,与蒙卡算法相比,用不上不占优势;同时注意到两者的用时都比较小,对整个病例的计算时长产生的影响较小。随着器官体积越大,算法的并行部分比重越高,加速比提高得越明显,但不会无限的提高,由阿姆达尔定律的限制,加速比最终取决于串行部分所占比重^[17]。大体积器官的算法用时显著的影响着整个病例的总时长。

理论上,一方面,蒙卡算法受随机点产生的随机性和随机点数量影响,同一模型的体积测量数据也会有微小波动,计算速度的较大提升也为通过增加随机点的数量而提高准确性提供了可能。另一方面,使用C++AMP的分组模式(将线程分配到不同分组,共享可编程的高速缓存)可产生最大限度的加速,特别是对多次使用各部分数据的算法。

3 结 论

本文使用微软最新推出的GPU并行计算规范C++AMP,设计并实现了计算医学图像三维重建模型体积的蒙特卡洛算法。经过测试结果的对比分析,GPU加速后的蒙特卡洛算法可以达到1%左右的计算精度和总体50倍左右的加速效果,可满足临床诊疗及医学研究的需要,具有较高的应用价值。C++AMP新技术为数据处理领域进行大规模并行计算提供了新的解决方案。

【参考文献】

- [1] 王猛,孔繁之. 医学图像三维可视化技术及其新进展[J]. 医学影像学杂志, 2015(6): 1095-1097.
WANG M, KONG F Z. Research on 3D visualization technology of medical image[J]. Journal of Medical Imaging, 2015(6): 1095-1097.
- [2] 陈秀文,杨荣骞. 基于VTK的图像可视化及肿瘤体积计算[C]//中国科协年会, 2015.
CHEN X W, YANG R Q. Image visualization and tumor volume calculation base on VTK[C]//Annual Meeting Of China Association For Science And Technology, 2015.
- [3] 吕晓琪,吴建帅,张明,等. 基于拟蒙特卡洛方法的三维医学重建模型体积测量方法研究[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(2): 612-614.
LÜ X Q, WU J S, ZHANG M, et al. Volume measurement study of 3D medical reconstruction model based on Quasi-Monte Carlo method[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(2): 612-614.
- [4] 吕晓琪,吴建帅,张宝华,等. 一种肝脏体积快速测量方法的研究与实现[J]. 实用放射学杂志, 2013, 29(11): 1836-1839.
LÜ X Q, WU J S, ZHANG B H, et al. Research and implementation of a fast liver volume measurement method[J]. Journal of Practical Radiology, 2013, 29(11): 1836-1839.
- [5] 路涛,周翔平. 肝脏体积测量及其临床意义[J]. 中华现代影像学杂志, 2005, 2(12): 1106-1109.
LU T, ZHOU X P. The liver volume measurement and clinical significance[J]. Journal of Chinese Modern Imaging, 2005, 2(12): 1106-1109.
- [6] 杨熙,徐子海. 图像融合技术在放疗靶区勾画中的应用进展[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(10): 79-82.
YANG X, XU Z H. Application progress of image fusion technology in the target delineation of radiotherapy [J]. Chinese Medical Equipment, 2015, 30(10): 79-82.
- [7] ADAMS B, DUTRÉ P. Interactive boolean operations on surfel-bounded solids[J]. ACM Trans Graph, 2003, 22(3): 651-656.
- [8] 刘玉身,雍俊海,张慧,等. 使用拟蒙特卡洛方法计算点模型的体积[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(3): 410-415.
LIU Y S, YONG J H, ZHANG H, et al. Using Quasi-Monte Carlo method to compute volume of point set[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2006, 18(3): 410-415.
- [9] KEISER R, PAULY M, KOBELT L P. Shape modeling with point-sampled geometry[J]. ACM Trans Graph, 2003, 22(3): 641-650.
- [10] 陈冠诚. C++AMP异构并行编程解析[J]. 程序员, 2012(4): 104-106.
CHEN G C. Analysis of C++AMP heterogeneous parallel programming[J]. Programmer, 2012(4): 104-106.
- [11] 林超. 基于C++ AMP加速并行蚁群算法[J]. 现代电子技术, 2014(23): 69-71.
LIN C. Accelerated parallel ant colony algorithm based on C++ AMP [J]. Modern Electronics Technique, 2014(23): 69-71.
- [12] 李银超. 基于C++AMP的图像并行计算理论与技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
LI Y C. Image parallel computing theory and technology research based on C++AMP[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [13] KRÜGER J, WESTERMANN R. Linear algebra operators for GPU implementation of numerical algorithms [J]. ACM Trans Graph, 2003, 22(3): 908-916.
- [14] 刘镇,郝冬宁,梅向东. 基于CUDA的并行加速渲染算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1457-1461.
LIU Z, HAO D N, MEI X D. Based on the parallel rendering algorithm in CUDA [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(11): 1457-1461.
- [15] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, 1991.
- [16] GREGORY K. Accelerated massively parallel computing with VISUAL C++ [M]. Posts & Telecom Press, 2014.
- [17] 冯叶,邓倩妮. 非对称多核体系下的阿姆达尔定律性能模型研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(8): 32-34.
FENG Y, DENG Q N. A study of Amdahl's law performance model on asymmetric multicore system [J]. Micro Electronics & Computer, 2011, 28(8): 32-34.

(编辑:薛泽玲)