

大规模科学数据体绘制技术综述*

王华维^{1,2}, 何柳¹, 曹轶^{1,2}, 肖丽^{1,2}

(1. 北京应用物理与计算数学研究所 计算物理重点实验室, 北京 100088;

2. 中物院高性能数值模拟软件中心, 北京 100088)

摘要:体绘制是刻画大规模科学数据中复杂物理特征的有效途径,然而,数据量极大、特征难以捕捉等问题依然是目前体绘制研究的主要挑战。为此,研究者们从三个方面对体绘制算法进行了深入研究,以提高大规模数据体绘制的效率和效果。一方面,依托硬件通过多处理器核来分担计算,降低单处理器核所要完成的计算量,是提高体绘制效率的一个有效途径。另一方面,充分发掘数据场内特性对三维数据场进行约简,大幅减少绘制处理数据量从而降低算法开销,也是提高体绘制效率的一个有效途径。同时,在体绘制算法中融入特征分析和特征增强方法,让复杂物理特征从数据场中突显出来,以实现科学数据的高质量绘制。本文对国内外体绘制技术相关研究进展进行了调研、综述,并分析了不同的研究方法,最后展望了未来体绘制技术研究的可能发展方向,包括应用驱动的特征体绘制、基于特征的约简体绘制、适应硬件的体绘制多级加速以及原位智能化体绘制等。

关键词:体绘制;并行加速;数据约简;效果增强;特征可视化

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文章编号:1001-2486(2020)02-001-12



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

A survey of the techniques of volume rendering for large-scale scientific data

WANG Huaui^{1,2}, HE Liu¹, CAO Yi^{1,2}, XIAO Li^{1,2}

(1. Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

2. CAEP Software Center for High Performance Numerical Simulation, Beijing 100088, China)

Abstract: Volume rendering is an effective method to visualize complex physical features in large-scale scientific data with high expressiveness, the difficulties in processing huge amount of data and capturing complex features, however, are still a great challenge to volume rendering. To address the challenges and improve efficiency and effect of volume rendering, researchers conducted in-depth research on volume rendering algorithms from three aspects. On the one hand, it is an effective way to improve the efficiency of volume rendering by sharing computation with lots of processor cores so as to reduce the computational amount of one processor core. On the other hand, by fully exploring the intrinsic characteristics of three-dimensional data fields, data reduction methods can greatly decrease the amount of data in the rendering process and thus reduce the overhead of a volume rendering algorithm. In addition, feature analysis and enhancement techniques can also be integrated into volume rendering algorithms, thus complex physical features are highlighted from the data fields and high-quality rendering of scientific data is achieved. A survey of recent advances on volume rendering techniques was presented and various research methods were analyzed. In the end, this paper makes prospection for future research directions on volume rendering of large-scale scientific data, including application-driven feature volume rendering, feature-based data reduction in volume rendering, hardware-adapted multi-level acceleration of volume rendering and in-situ intelligent volume rendering.

Keywords: volume rendering; parallel acceleration; data reduction; effect enhancement; feature visualization

随着千万亿次计算机的出现以及数值模拟技术的不断进步,激光聚变、高温高压物理、大气与环境等众多应用领域需要使用成千上万个处理器核来实现高精密的三维数值模拟,以得到高科学

置信度的模拟结果,促进相关领域科技水平的持续快速发展。当前,由于物理建模的精细化和并行规模的增加,数值模拟的计算规模达到了成千上万倍的增加,相应地,它们输出的数据规模也大

* 收稿日期:2019-09-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0202203);国防基础科研计划资助项目(C1520110002);计算物理重点实验室基金资助项目(9140C690504150C69305)

作者简介:王华维(1976—),男,湖北云梦人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:wang_huawei@iapcm.ac.cn

幅增加:单时间步数据量可以达到十几字节甚至数十 GB(十亿字节),一次完整模拟输出的时变数据总量将达 TB(万亿字节)甚至是 PB(千万亿字节)量级。例如,应用全波电磁场时域求解器(JEMS-FDTD)对 L 波段隐形战斗机整机瞬态电磁特性做数值模拟时,使用 6000 个处理器核进行了 2 万个时间步的模拟,网格规模为 $3400 \times 2000 \times 1060$ (约 72 亿个网格点),单时间步输出数据量为 173 GB,共输出了 200 个时间步的结果,时变数据总量达到了 34 TB。

高精密度数值模拟输出的大规模数据集对领域专家分析物理问题提出了极大的挑战,主要困难存在于以下方面:

1)数据场中物理量变化剧烈,特征多样,而且在空间或时间上分布不均匀,难于精确刻画或准确定位;

2)数据量极大,并以复杂的拓扑组织分布式地存储于并行机多结点上,对处理和分析带来极大困难;

3)根据实际应用不同,数据集具有多种不同的复杂网格结构,例如直线网格、自适应结构(AMR)网格、变形结构网格或者非结构网格等。

如何有效、高效地把大规模复杂三维数据场中的物理特征以可视的方式展现出来,让领域专家能有效、深入地观察、理解和分析物理现象,从而得到科学发现或验证科学设想,是实际应用领域迫切需要解决的问题。

体绘制是实现三维数据场可视化的核心算法之一^[1-4],它可以直接而有效地展示数据场内部的物理现象,具有非常强的表现力。该方法从视点向屏幕上的各个像素发出光线,光线穿过数据场时对数据场做重采样,然后根据光学模型计算采样点颜色效果并依视点顺序融合起来,即得屏幕上像素的颜色值,参见图 1。绘制质量和绘制效率是人们所关心的两个核心问题,即一方面要准确表现出数据场内部信息,另一方面还要满足交互可视分析的速度要求。随着科学计算技术的不断发展,模拟得到的物理现象越来越精细,理论上,不断加密采样点即可在体绘制中准确表现各个物理特征。然而,体绘制中采样计算与图像合成都是非常费时的,且两者的计算开销都与采样点总数成正比,因此,不断增加采样点势必引起巨大的计算开销,并导致绘制时间过长,甚至引起系统崩溃。

为了适应日益增长的数据量以及数据中日益复杂的物理特征,研究者们从多个方面对体绘制

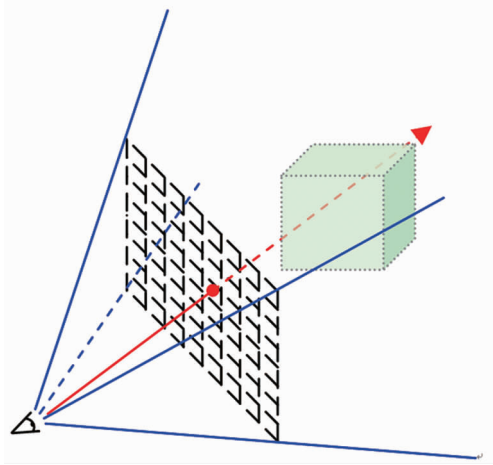


图 1 光线投射原理图

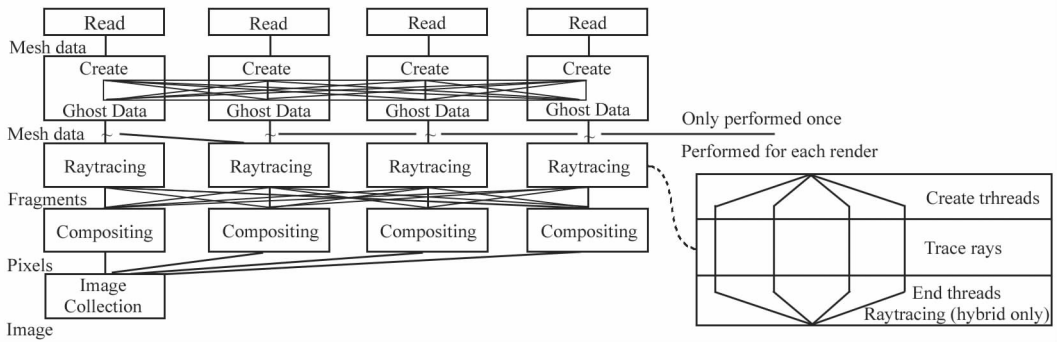
Fig. 1 Principle diagram of ray casting algorithm

算法进行了深入研究,以不断提高绘制效率、增强绘制效果。

1 体绘制并行加速技术

1.1 并行绘制

引入并行处理技术,发展并行体绘制算法,是提高绘制效率的一个有效途径^[5-6]。各种体绘制算法可以通过并行机的多核加速能力来提升性能,包括光线投射法^[7-8]、单元投影法^[9]、错切-变形法^[10]以及抛雪球法等^[11]。由于体绘制的主要计算集中于采样计算和图像合成两个阶段,因而典型的并行模式按数据并行和图像并行分两步实现,而其中的 I/O 策略、数据组织以及负载均衡等是影响并行效率的重要因素。在分布式可视化软件 VisIt^[12]中,Childs 等提出了一个基于合约的可视化流程^[13],可根据绘制参数在合适的可视化阶段执行相应优化策略,例如 I/O 预筛选、数据规整化、负载均衡选择等,由此提高了绘制效率。混合同步并行格式是他们采用的另一种负载均衡优化办法^[14]。后来,Moloney 等提出了一个动态负载均衡策略,可预估各个像素的绘制开销从而平衡地分配计算任务^[15]。尽管在并行体绘制中数据后排序方式被广泛采用,然而,Moloney 等研究发现有几种并行体绘制算法在先排序方式下可以有更好的性能^[16]。针对大规模并行机,Howison 等提出了 MPI + OpenMP 混合同步并行绘制算法(参见图 2),充分利用多核结点上的共享内存以减少内存消耗和数据通信量,绘制中并行规模可达 21.6 万核,对 46 083 的超大规模网格数据实现高分辨率图像的交互绘制帧率^[17]。

图 2 MPI + OpenMP 混合并行绘制算法^[17]Fig. 2 Hybrid parallel rendering MPI + OpenMP algorithm^[17]

1.2 GPU 硬件加速

利用 GPU 硬件加速功能,加快绘制流程中的采样和合成计算,是提高体绘制效率的另一个办法^[18-23]。Engel 等探讨了多纹理和相关纹理读技术,以实现基于纹理的预积分体绘制算法,可取得高质量的绘制效果^[24]。Stegmaier 等则发展了一种灵活的硬件绘制框架,可集成单程光线投射算法的多种不同形式^[25]。利用图形硬件可编程能力,还可以加速估算采样间距^[26]或确定采样点位置参数^[27]这些较为复杂的计算,提升自适应采样策略下的体绘制性能。Singh 和 Narayanan 提出了一种基于光线投射的隐式曲面绘制算法^[28],其核心为自适应推进求根法,非常适合 GPU 的 SIMD 运算模式,因而该算法取得了较高的绘制效率。由于 GPU 纹理内存容量有限,不少工作也投向了纹理数据压缩及其随机访问技术,并探讨了适用于 GPU 的有效数据结构^[29-30]。Fout 和 Ma 提出了基于块的变换编码压缩方法^[31],该方法在压缩时能保持感觉上重要的体特征因而不影响绘制质量,而且它的解压速度也很快。kD-Jump^[32]是最近提出的一种无栈遍历技术,可有效操作隐式 kD 树,让遍历程序直接返回到下一个有效节点而无须额外的节点访问。另一方面, GPU 也常常被装上可视化并行服务器,使得人们可以用并行机的海量存储能力以及多 CPU 耦合多 GPU 的双重加速能力来应对大规模数据集的高质量快速绘制。孔明明等^[33]在用千兆以太网互联的可视化机群系统(含 16 个结点,配备 NVIDIA 5950 图形卡)上,采用基于三维纹理映射的硬件加速并行体绘制算法,实现了 Visible Human 数据集的可视化,其数据量约为 3 GB,绘制速度达到 2 s。Fogal 等^[34]在可视化机群上开展的并行可视化算法研究表明,他们已可使用 128 个计算结点耦合 256 颗 GPU,完成单时刻千亿量级数据的体绘制,

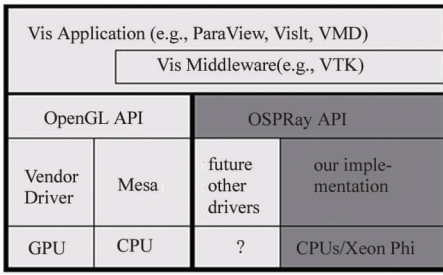
网格单元数量达到百亿。

1.3 光线追踪体绘制

随着高性能计算机硬件体系结构越趋复杂,包括体绘制在内的可视化算法需要不断重构、优化才能适应包含多核/众核 CPU 的复杂硬件结构。应对该挑战, Wald 等^[35]设计了一种基于 CPU 光线追踪的科学可视化通用框架 OSPRay,可以运行在不同 SIMD 宽度和多样化 HPC 计算资源上。该框架提供了一个与 OpenGL 同级别的抽象 API,可集成到目前主流的可视化软件中,例如 VTK、ParaView 和 VisIt 等。图 3 显示了 OSPRay 的系统组件及其相互关系。

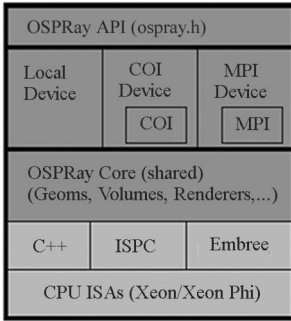
与现存的光线追踪框架 Manta^[36]和 Embree^[37]相比, OSPRay 更加注重对于体数据的有效支持。该框架通过光线追踪技术实现体绘制,能充分利用当前最新的众核 CPU 环境。Wald 等在工作站和 TACC 节点这两种具有代表性的平台上(其中工作站使用了 Intel Xeon E5-2699 v3 CPUs 以及一块 NVIDIA Titan X 图形卡, TACC 节点使用了两块 Intel Xeon E5-2680 v2 CPUs 和一块 NVIDIA Tesla K40m 图形卡),对基于 OSPRay 和基于 OpenGL 的 ParaView 进行了性能对比。在仅仅使用 CPU 渲染时, OSPRay 的性能大幅超过 Mesa,而对于 GPU 渲染, OSPRay 也取得了比 OpenGL 更优的性能表现。

在此基础上, Wu 等提出了 VisIt-OSPRay 高性能可扩展的混合并行绘制系统^[38],将 OSPRay 体绘制算法扩展为一种 MPI 加线程的混合并行模式,在一个计算结点上应用可高效使用众核处理器的 CPU 并行 OSPRay^[35],在结点间采用 sort-last 绘制流水线代替 direct-send 融合器完成图像融合,由此,在生成与经典光线投射体绘制相当的效果下,他们取得了 30 倍的绘制加速比,并且将体绘制算法并行扩展到了 32 768 个 CPU 核上。



(a) OSPRay API 在常见的可视化应用程序软件堆栈中的位置

(a) OSPRay API in the context of the ubiquitous software stack found in visualization applications



(b) 基于 CPU 实现的 OSPRay 组件结构图

(b) OSPRay components that comprise our CPU-based implementation.

图 3 OSPRay 的软件架构及其在可视化应用中的定位^[35]

Fig. 3 Software architecture of OSPRay and its location in visual applications^[35]

2 体绘制数据约简技术

2.1 自适应绘制

采用自适应采样方法,用较少的采样点来刻画数据内在物理变化,从而减少计算、内存和通信等多方面的开销,也是提高绘制效率的一个重要途径。常见的自适应采样方法包括空间跳跃^[2]、分层次自适应采样^[8,39]、细节导向的采样法^[40]以及梯度场量值法等^[41]。另外,Kraus 等利用一个“启示器”程序来估算合适的采样间距,并据此在三个方向上实施自适应采样^[26],可大量减少采样点。Suwelack 等则从转换函数和数据集的谱分解中导出相配的采样准则,集成得到一个基于 GPU 加速的自适应光线投射体绘制算法^[42]。Corcoran 和 Dingliana 利用图像帧间一致性来快速生成二维的重要性图谱,由此指导进行自适应采样,在视点或转换函数改变时实现体绘制图像快速刷新^[43]。然而,以上方法均难以在降低采样点的同时,准确把握住物理量取值的变化规律,针对

这个问题, Marchesin 和 Verdière 提出了一个自适应单元投影体绘制技术^[27],在绘制中可以很好抓住物理量变化的单调区间,得到满意的绘制效果。大规模科学计算中的数据量远远超过了单机硬盘和内存的容量,此时,并行处理体绘制是不可或缺的,但在并行模式下进行自适应采样,其中的采样点数据组织、数据块空间关系、视点有序性以及负载均衡等方面都将面临难题。虽然参考文献[8]的引文和文献[39]中的绘制算法是并行模式,但它们只是针对 AMR 网络的简单按层自适应,而在单层数据分块上仍是均匀采样格式。为了适应大规模科学数据,Wang 等^[44]改进了 Marchesin 和 Verdière 的自适应采样方法(参见图 4,蓝色采样点将在跨单元判断中被舍弃,红色采样点被保留),并在分布式并行环境下实现了算法并行化,解决了算法中采样点管理与负载均衡等问题,相对于分布式环境下传统均匀采样方法取得了较大的性能提升。

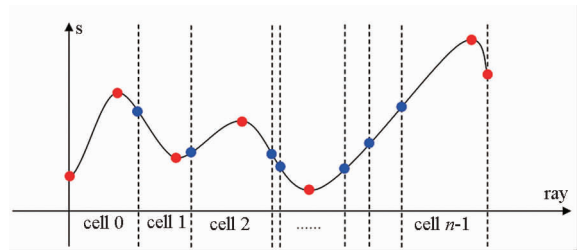


图 4 改进的自适应采样方法^[44]

Fig. 4 Improved adaptive sampling method^[44]

2.2 多分辨率绘制

发展多分辨率绘制技术,在图像质量和绘制速度之间折中,从而在有限的资源预算下最快地得到绘制结果,也是处理大规模数据、优化绘制性能的一类方法。Han-Wei Shen 研究组的 Gao, Wang 等提出了基于小波的多分辨率体绘制框架^[45-46],参见图 5,他们将数据转换为一种多分辨率小波树的结构,通过子树划分与预选节点重构优化了并行绘制中的负载均衡和数据通信。Knoll 等则提出了一种多分辨率光束跟踪体绘制算法,可以在普通 PC 上绘制较大的体数据^[47]。Suter 等对体数据建立了一个基于张量逼近的多分辨率格式,并实现了三维数据场的多尺度特征可视化与多分辨率体绘制^[48]。Sicat 等提出了一种不同的多分辨率体数据表示格式——概率密度函数(probability density function, pdfs)稀疏体,即允许对大规模体数据做 out-of-core 计算,又可以实现 GPU 上的交互多分辨率体绘制^[49]。基于多

分辨率技术的进一步算法优化还包括基于图像质量评测的细节层次选择^[50]、视点相关的数据裁减^[51]、突出重点区域的混合分辨率绘制^[52]、基于小波的数据压缩等^[53]。

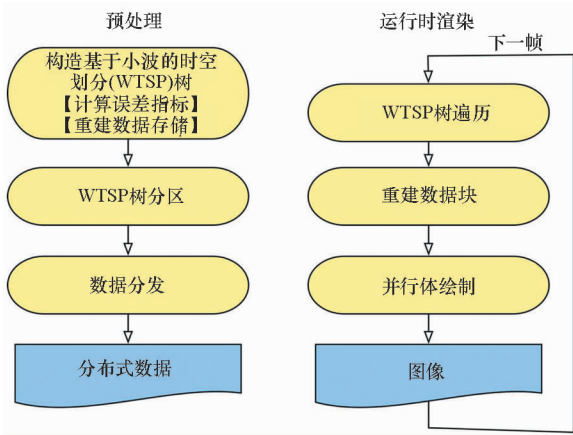


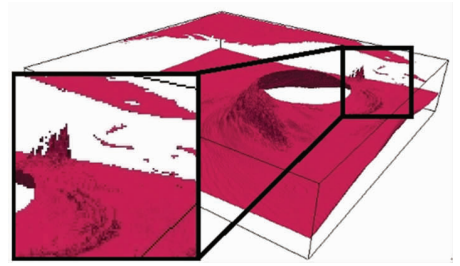
图 5 大规模时变数据多分辨率体绘制的算法流程简图^[46]

Fig. 5 Algorithmic flow chart of multi-resolution volume rendering for large-scale time-varying data^[46]

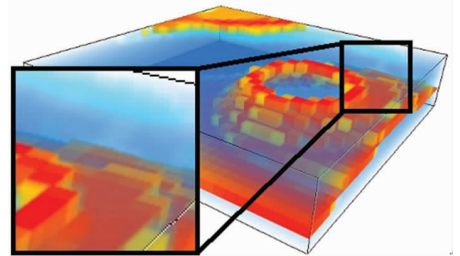
2.3 PDF 约简模型

让数值模拟与可视化紧密结合、协同工作,基于概率分布函数(Probability Distribution Function, PDF)对计算结果在原位直接进行数据分析与约简处理,可以有效减少数据传输和 I/O 开销,满足大规模数值模拟数据及时或实时可视分析的需求^[54]。Han-Wei Shen 研究组的 Wang 等^[55]用基于高斯混合模型的概率分布函数来原位约简数据,然后进行基于统计的高质量可视化,提出用空间高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)对空间信息压缩存储,将之前基于分布的表示方法中没有包含的空间信息考虑进来。为了保证较小的存储开销,使用自适应方案来确定每个空间 GMM 所需的高斯分量数目。他们定性地将他们的表示与现有的分布表示进行了比较(见图 6,测试数据为 Isabel 数据集,500 × 500 × 100 网格点^[55])。他们的方法能够计算任何位置的值的概率密度函数,它代表了可能的值及其出现概率,实验结果令人满意,在每个体素处具有较小的偏置和方差。

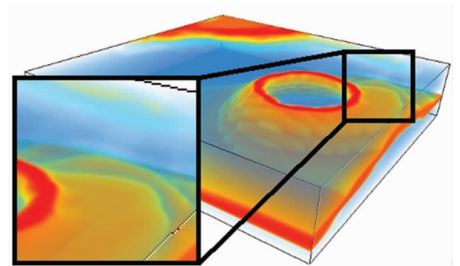
Wei 等^[56]对于多种场混合的数据集提出了两种有效的基于局部分布的特征搜索算法。一种是边缘特征搜索,该算法可以为用户提供对于每个数据场的特征描述进行视觉探索;另一种是联合特征搜索,用户能够探索基于局部区域的若干属性的联合特征。Dutta 等^[57]提出了一种局部各



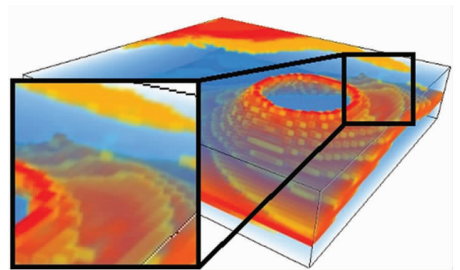
(a) 原始数据集渲染图
(a) The field from the raw data



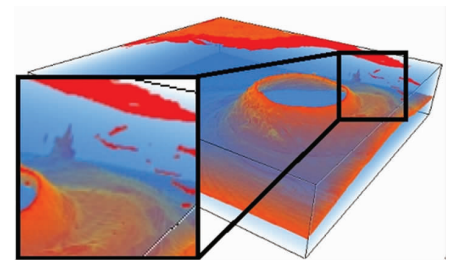
(b) 使用块直方图
(b) Block histogram



(c) 使用带有插值的块直方图
(c) Block histogram with interpolation



(d) 使用高斯混合模型块
(d) Gaussian mixture model block



(e) 使用 PDF 约简模型

(e) results obtained using the PDF reduction model

图 6 使用基于 PDF 约简模型渲染出的效果图^[55]
Fig. 6 Rendering effects using distribution-based representation^[55]

向同性驱动的分块随机数据汇总技术,该算法可以在原位(in-situ)工作,并且通过分块汇总来保留数据统计属性,从而实现有效的概率特征分析和可视化。Wang 等^[58]提出了一种基于图像和分布的大规模数据分析表示,它可以将传递函数的探索以及不确定性量化。他们通过科学家对图像做出的选择以及后处理机器所能承受的带宽与存储来生成代理(proxy)。只需要访问这些代理,就可以在后处理机器上执行分析和可视化。Hazarika 等^[59]提出一种灵活的基于分布的不确定性建模策略,该策略基于统计健全的多变量技术——Copula。这项技术专门针对科学数据集不确定性建模的需要而定制,使用这种灵活的策略,他们提出了一种在标量以及矢量场里提取不确定性/概率特征的方法。

3 体绘制效果增强技术

3.1 信息辅助可视化

借助于信息熵^[60],抽取出包含感兴趣特征或重要信息的数据部分并在绘制中赋以特别的表现力,是应对时变海量数据可视分析的重要手段。利用互信息测度,Viola 等提出了一个重要性驱动的自动聚焦方法^[61],以便于观察体数据中的不同特征。Wang 等^[62]则利用条件熵构造重要性曲线,以刻画局部数据的时间特性,然后通过聚类来分析各个重要性曲线的不同时间趋势特征,从而得到了一个展示、理解时变数据所蕴含动态时间特征的有效方法,参见图 7。绘制时变数据的时候,人们还可以利用 Shannon 熵来找出最佳的静态或动态视点位置^[63]。Feixas 等则把 Shannon 熵和 KL 距离^[64]联合起来,发展出高效的视点选择和效果加强算法^[65]。Wang 和 Ma 分析了在大规模数据可视分析中信息与知识驱动求解方法的重要性,并总结了相关的几个研究方向^[66]。

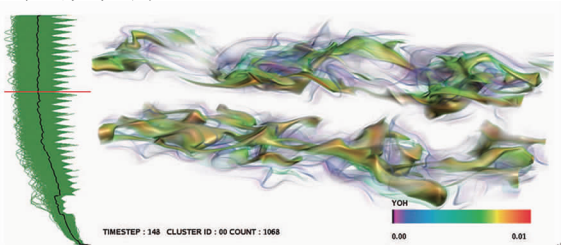


图 7 绘制中只突出一个重要性曲线聚类对应的数据特征而忽略其他^[62]

Fig. 7 Only the data features corresponding to the clustering of curves of importance are highlighted, while the others are ignored in rendering^[62]

3.2 预积分绘制

在相邻采样点之间插补中间信息并计算光强积分,可减少合成误差,提高绘制质量;另一方面,预先计算光强积分,供实时绘制中直接取用,可提高绘制效率。在预积分体绘制中,常用的插补函数包括一次^[24]和二次多项式^[67]。Guetat 等在预积分中很好地集成了光照模型,减少了绘制误差^[68]。Lum 等给出了预计算积分的快速算法^[69],而 Kye 等则简化了预积分表^[70]。

3.3 转换函数设计

转换函数直接关系到体绘制的输出效果,是体绘制的本质参数之一,因而深受重视。研究者们设计出了大量的转换函数,用以突出表现数据中蕴含的各种时空特征。这些转换函数主要分为两类:数据型和图像型^[71],数据型转换函数包括基于特征尺度^[72]、空间遮挡频谱^[73]、密度聚类^[74]以及可见性^[75]的转换函数等,而 Wu 和 Qu^[76]提出以编辑图像来指导转换函数生成,这样得到的是图像型转换函数。Guo 等提出了一种“所见即所得”的可视化方法,可直接在体绘制图像上简单勾画,即实现对转换函数的相应修改,并由此设计了多种绘制效果编辑工具^[77]。最近,Zheng 等建立了反映深度有序感觉的能量函数,并通过优化能量函数来调节透明度和光照参数,从而提升体绘制中深度有序效果,更好展现数据场内部结构^[78]。

3.4 光照效应

引入、改善光照效果可提升绘制质量,主要办法包括:在预积分体绘制中集成光照模型,这需要线性^[69]或非线性^[68]插值梯度方向;调节物质界面上的光照参数以增强界面表现效果^[79];在绘制中加入光衰减效应^[80]或全局光照效果^[81]等,图 8 为使用全局光照渲染出具有 $128 \times 128 \times 64$ 网格点的发动机工业 CT 扫描结果。其中图 8(a)为对照,使用了基于局部光照的光线投射算法,图 8(b)和(c)都使用了全局光照。其中图 8(b)为使用材质 A 得到的全局光照图,该材料吸收绿光和蓝光的速度更快,并沿光的方向逐渐变红,图 8(c)为使用另一种材质 B 得到的全局光照图,该材质在高密度区域显示为饱和红色,周围区域由于渗色而饱和度较低。Kniss 等^[82]提出了一个基于小部件的界面,用于直观地指定高维不透明度/颜色转换函数,并描述如何在图形硬件中有效地实现这些高维转换函数。他们还通过在屏幕外渲染缓冲区中累积衰减光来描述阴影的渲染,使

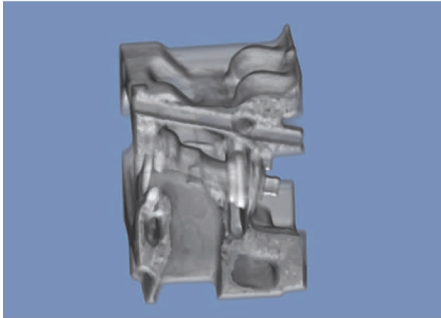
用标量梯度幅度避免均匀材料的阴影。

为了更真实地渲染自然现象,已经有人通过使用更复杂的体积光照模型来做各种工作^[83]。此外,在应用更逼真的可视化模型方面, Krueger^[84]使用与数据集具有各种光照交互的粒子模拟将传输理论应用于体绘制。Rodgman 和 Chen^[85]允许包括折射率的转换函数来模拟由于

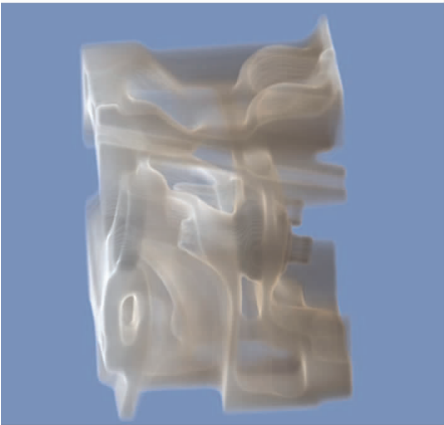
折射引起的光弯曲的影响。Noordmans 等^[86]模拟光的颜色变化,因为它与材料相互作用,并允许色彩不透明,而不是单个标量。Kniss 等^[80]使用图形硬件有效地生成高度逼真的渲染,模拟体积阴影,前向散射和色度衰减的影响。通过光照效应还可以作为说明张量场的手段。除了使用颜色和不透明度转换函数之外,Kindlmann 和 Weinstein^[87]还描述了使用光照张量来指示各向异性的类型和方向的想法。

3.5 边界增强技术

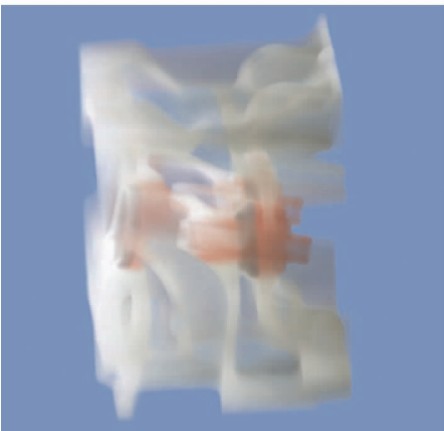
为了增强体绘制结构的显示效果,令绘制结果能够更有效地反映出体数据的结构特征,最有



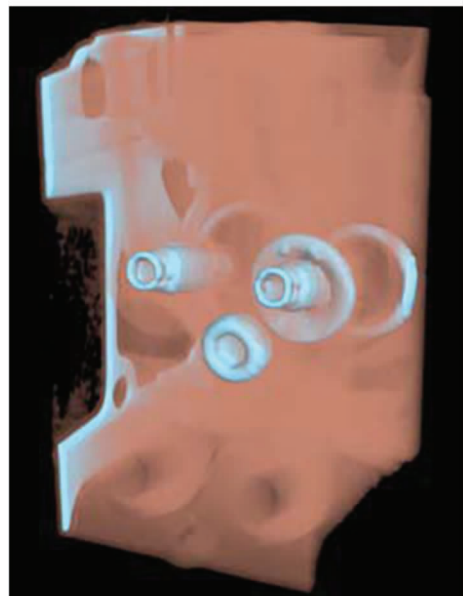
(a) 使用了局部光照的光线投射算法
(a) Ray casting with local illumination



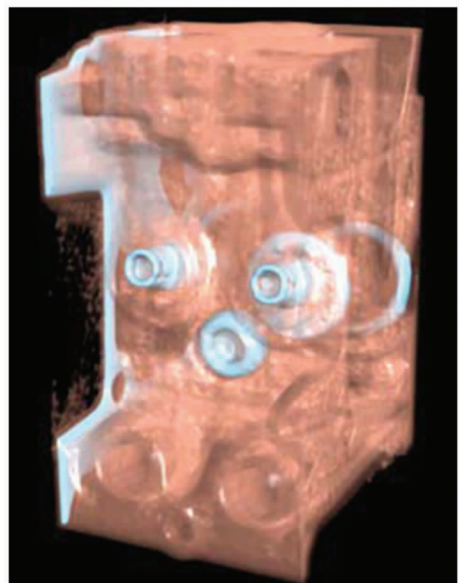
(b) 使用材质 A 得到的全局光照图
(b) Ray casting with global illumination using material A



(c) 使用材质 B 得到的全局光照图
(c) Ray casting with global illumination using material B

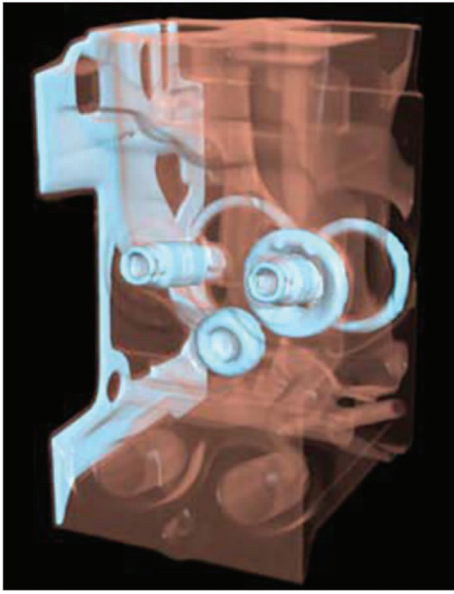


(a) 在棕色区域不使用光照效果
(a) No lighting effects in brown areas

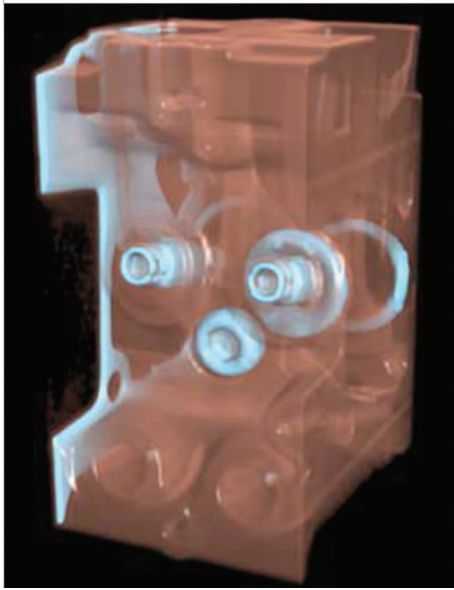


(b) 加上光照效果
(b) Add lighting effects

图 8 发动机工业 CT 扫描的全局光照渲染结果
Fig. 8 Global illumination of an industrial CT scan of an engine



(c) 增加边界处的不透明度
(c) Increase the opacity at boundaries



(d) 使用光照传递函数的效果
(d) Use the light transfer function

图 9 不同方法得到的马达 CT 数据的绘制结果^[79]

Fig. 9 Images generated from a CT scan of an engine^[79]

效的方式就是将体数据中物体的细节,比如边界、轮廓等突出绘制。增强边界显示效果的方法有很多,Lum 等^[79]提出了一种基于梯度采样的光照传递函数,用以突出显示物质之间的边界面,图 9 为一系列使用不同方法得到的马达 CT 数据的绘制结果。其中图 9(a)没有使用光照效果,其内部结构几乎无法看到;图 9(b)加上了光照效果,棕色区域变得清晰,但是在均质区域中,光线的不规则变化使我们很难看到物质的边界;图 9(c)通过增加这些边界处的不透明度,边界表面变得清晰可

见,但是很难观察到均匀区域处的厚度;图 9(d)使用光照传递函数得到的结果图,既能看到清晰地物质边界,又能感受到均值区域的厚度。Tenginakai^[88]提出了一种使用局部 k 阶中心矩及其相互关系定位物质边界处的显著等值面的方法。Roettger 等^[89]提出了通过将二维直方图中的空间连接区域归组进行物质边界分类。Huang 等^[90]加入了空间信息,将传递函数的定义域扩展到三维,利用设计的代价函数在三维空间中执行区域增长算法,准确地揭示了物质边界。Wang 等^[91]在二维特征空间内利用高斯混合模型和椭圆形的传递函数,提高了边界面的准确度和传递函数的设计效率。Caban 等^[92]提出了基于纹理特征的传递函数,为每一个体素计算多种纹理特征,在添加了纹理特征后,体素的结构可以得到有效的区分。Tzeng 等^[93]提出将采样点的空间信息作为自变量,利用神经网络设计了高维传递函数,更好地提取用户感兴趣的物质。

4 体绘制技术展望

对于 TB 量级时变数据场,虽然可用数万核的大规模混合并行实现交互体绘制^[17],但这样庞大的计算资源在实际应用中是极难得到的。一方面,大规模并行机常常承担着繁重的科学计算任务,其计算资源是非常宝贵的,一般系统仅把其中 10% 的结点分配给可视化任务使用。另一方面,在目前的并行体绘制算法中,主要是应用均匀采样或分层均匀采样,而没有根据数据内在特性有效地设定采样点,因而浪费了计算与存储资源。一般而言,在数百至数千核并行规模下,为了清晰展现精细物理特征,未来人们还需进一步探讨高效率的体绘制算法,从软件和硬件两个角度加速算法,绘出最佳效果,取得最快速度。

应对 TB 量级以上时变科学数据,清晰快速展现数据中蕴含的精细物理特征,人们可从四个方面进一步探讨体绘制技术:

1) 应用驱动的特征体绘制。针对具体应用中的复杂数据特征,研究特征分析与抽取技术,重点展现用户感兴趣特征,发展复杂特征的体绘制效果增强技术,提升特征结构的层次感与真实感。

2) 基于特征的约简体绘制。深入挖掘数据内在特性,研究基于特征的数据约简技术。在大幅降低数据处理量的同时,准确把握数据场中精细物理特征,进一步发展相应的自适应体绘制算法,显著提升数据特征的绘制效率。

3) 适应硬件的体绘制多级加速。适应高性

能计算机复杂体系结构,发展结点间多进程数据并行处理、结点内多核耦合加速器多线程局部数据并行处理的混合并行绘制技术,对体绘制算法进行多级加速。

4) 原位智能化体绘制。紧密耦合数值模拟应用与后处理可视化,发展原位处理与绘制技术,避免 I/O 瓶颈,在原位模式下研究自动特征分析技术与自动转换函数设计方法,发展智能化体绘制算法,避免交互瓶颈。

基于这四个方面的发展,未来有望显著提高体绘制的速度和效果,实现 TB 量级以上时变科学数据的交互绘制性能,满足应用领域对交互可视分析的急切需求。

5 结论

本文对于目前大规模科学数据体绘制研究中的两个关键问题——绘制效率和绘制效果的研究现状进行了总结。近几年,随着科学计算的发展以及 HPC 运算能力的提高,科学与工程模拟产生的数据量越来越大,传统的科学可视化方法越来越难以应对千万亿次计算数据的处理与分析。为了解决超大规模计算数据分析的性能瓶颈,研究者们提出了并行加速和数据约简等方法来提升绘制处理效率。同时,为了实现高逼真度的绘制效果,研究者在特征抽取与效果增强等方面也取得了较好成果,更好的绘制效果可以带给领域专家更多的信息。应对未来更庞大的数据量、更复杂的物理特征,体绘制算法的效率和效果还需不断加强,这要求研究者们持续深入开展相关研究。展望未来,可能进一步开展的研究包括应用驱动的特征体绘制、基于特征的约简体绘制、适应硬件的体绘制多级加速以及原位智能化体绘制等。通过这些研究,未来力争显著提高体绘制的速度和效果,满足应用领域对 TB ~ PB 量级数据交互可视分析的急切需求。

参考文献 (References)

- [1] Levoy M. Display of surfaces from volume data [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(3): 29 - 37.
- [2] Drebin R A, Carpenter L, Hanrahan P. Volume rendering [C]// Proceedings of ACM Siggraph Computer Graphics, ACM, 1988, 22(4): 65 - 74.
- [3] Levoy M. Efficient ray tracing of volume data [J]. ACM Trans. Graph., 1990, 9(3): 245 - 261.
- [4] Kaufman A, Mueller K. Overview of volume rendering [M]// The visualization handbook, USA: Academic Press, 2005, 7: 127 - 174.
- [5] Nieh J, Levoy M. Volume rendering on scalable shared-memory MIMD architectures [C]// Proceedings of the Workshop on Volume Visualization, New York: ACM Press, 1992: 17 - 24.
- [6] Ma K L, Painter J S, Hansen C D, et al. Parallel volume rendering using binary-swap compositing [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, 14(4): 59 - 68.
- [7] Palmer M E, Taylor S, Totty B. Exploiting deep parallel memory hierarchies for ray casting volume rendering [C]// Proceedings of IEEE Symposium on Parallel Rendering (PRS'97), IEEE, 1997: 15 - 22.
- [8] Ma K L. Parallel rendering of 3D AMR data on the SGI/Cray T3E [C]// Proceedings of Seventh Symposium on the Frontiers of Massively Parallel Computation, IEEE, 1999: 138 - 145.
- [9] Ma K L, Crockett T W. A scalable parallel cell-projection volume rendering algorithm for three-dimensional unstructured data [C]// Proceedings of IEEE Symposium on Parallel Rendering (PRS'97), 1997: 95 - 104.
- [10] Sano K, Kitajima H, Kobayashi H, et al. Parallel processing of the shear-warp factorization with the binary-swap method on a distributed-memory multiprocessor system [C]// Proceedings of IEEE Symposium on Parallel Rendering (PRS'97), 1997: 87 - 94.
- [11] Li P P, Whitman S, Mendoza R, et al. ParVox—a parallel splatting volume rendering system for distributed visualization [C]// Proceedings of IEEE Symposium on Parallel Rendering (PRS'97), 1997: 7 - 14.
- [12] Childs H, Pugmire D, Ahern S, et al. Extreme scaling of production visualization software on diverse architectures [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2010, 30(3): 22 - 31.
- [13] Childs H, Brugger E, Bonnell K, et al. A contract based system for large data visualization [C]// VIS 05. IEEE Visualization, 2005: 191 - 198.
- [14] Childs H, Duchaineau M A, Ma K L. A scalable, hybrid scheme for volume rendering massive data sets [C]// Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization, EGPGV 2006, Braga, Portugal, 2006: 153 - 161.
- [15] Moloney B, Weiskopf D, Möller T, et al. Scalable sort-first parallel direct volume rendering with dynamic load balancing [C]// Proceedings of Eurographics Symposium on Parallel Graphics, 2007: 45 - 52.
- [16] Moloney B, Ament M, Weiskopf D, et al. Sort-first parallel volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(8): 1164 - 1177.
- [17] Howison M, Bethel E W, Childs H. Hybrid parallelism for volume rendering on large-, multi-, and many-core systems [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(1): 17 - 29.
- [18] Cabral B, Cam N, Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware [C]// Proceedings of the 1994 Symposium on Volume Visualization, ACM, 1994: 91 - 98.
- [19] Krüger J, Westermann R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering [C]// Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 (VIS'03). IEEE Computer Society, 2003: 38.
- [20] Roettger S, Guthe S, Weiskopf D, et al. Smart hardware-accelerated volume rendering [C]// Symposium on Data Visualisation, 2003: 231 - 238.
- [21] 罗月童, 薛晔, 刘晓平. 基于 GPU 的多分辨率体数据重

- 构和渲染[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 107-111.
- LUO Yuetong, XUE Ye, LIU Xiaoping. GPU based multi-resolution volume data reconstruction and rendering [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(1): 107-111. (in Chinese)
- [22] 赵利平. 基于 GPU 大规模数据体绘制方法研究与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- ZHAO Liping. The research and implementation on large data sets volume rendering based on GPU[D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- [23] 陈为, 夏佳志, 张龙, 等. 一种统一的硬件加速自适应 EWA Splatting 算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(8): 1571-1581.
- CHEN Wei, XIA Jiazhi, ZHANG Long, et al. A uniform hardware-accelerated adaptive EWA Splatting algorithm[D]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(8): 1571-1581. (in Chinese)
- [24] Engel K, Kraus M, Ertl T. High-quality pre-integrated volume rendering using hardware-accelerated pixel shading[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware. New York, NY, USA: ACM, 2001: 9-16.
- [25] Stegmaier S, Strengert M, Klein T, et al. A simple and flexible volume rendering framework for graphics-hardware-based raycasting[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Volume Graphics, IEEE, 2005: 187-241.
- [26] Kraus M, Klein T, Strengert M, et al. Adaptive sampling in three dimensions for volume rendering on GPUs [C]// Proceedings of the 6th International Asia-Pacific Symposium on Visualization, IEEE, 2007: 113-120.
- [27] Marchesin S, de Verdiere G C. High-quality, semi-analytical volume rendering for AMR data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1611-1618.
- [28] Singh J M, Narayanan P J. Real-time ray tracing of implicit surfaces on the GPU[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(2): 261-272.
- [29] Lefohn A E, Kniss J, Strzodka R, et al. Glift: generic, efficient, random-access GPU data structures [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(1): 60-99.
- [30] Foley T, Sugerman J. KD-tree acceleration structures for a GPU raytracer [C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware, ACM, 2005: 15-22.
- [31] Fout N, Ma K L. Transform coding for hardware-accelerated volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1600-1607.
- [32] Hughes D M, Lim I S. Kd-jump: a path-preserving stackless traversal for faster isosurface raytracing on gpus [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1555-1562.
- [33] 孔明明. 基于 GPU 集群的并行体绘制[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- KONG Mingming. GPU Cluster based parallel volume rendering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [34] Fogal T, Childs H, Shankar S, et al. Large data visualization on distributed memory multi-GPU clusters [C]// Proceedings of the ACM Siggraph/Eurographics Conference on High Performance Graphics, 2010: 57-66.
- [35] Wald I, Johnson G, Amstutz J, et al. OSPRay—a CPU ray tracing framework for scientific visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(1): 931-940.
- [36] Brownlee C, Patchett J, Lo L T, et al. A study of ray tracing large-scale scientific data in two widely used parallel visualization applications[M]. The Eurographics Association, 2012.
- [37] Wald I, Woop S, Benthin C, et al. Embree: a kernel framework for efficient CPU ray tracing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-8.
- [38] Wu Q, Usher W, Petruzza S, et al. VisIt-OSPRay: toward an exascale volume visualization system[M]. The Eurographics Association, 2018.
- [39] Kähler R. Accelerated volume rendering on structured adaptive meshes[D]. Berlin: Freie University, 2005.
- [40] Frisken S F, Perry R N, Rockwood A P, et al. Adaptively sampled distance fields: a general representation of shape for computer graphics [C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000: 249-254.
- [41] 唐炜, 姚莉秀, 杨杰, 等. 基于矢量场自适应采样算法的图像体绘制技术[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(10): 1650-1654.
- TANG Wei, YAO Lixiu, YANG Jie, et al. An adaptive sampling algorithm based on vector field for medical volume rendering[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(10): 1650-1654. (in Chinese)
- [42] Suwelaek S, Heitz E, Unterhinninghofen R, et al. Adaptive GPU ray casting based on spectral analysis[C]// Proceedings of International Workshop on Medical Imaging and Virtual Reality, Springer, 2010: 169-178.
- [43] Corcoran A, Dingliana J. Image space adaptive volume rendering [C]// Proceedings of Visualization and Data Analysis, 2012. SPIE 8294: 82940M.
- [44] Wang H W, Ai Z W, Cao Y, et al. A parallel preintegration volume rendering algorithm based on adaptive sampling[J]. Journal of Visualization, 2016, 19(3): 437-446.
- [45] Gao J, Wang C, Li L, et al. A parallel multiresolution volume rendering algorithm for large data visualization[J]. Parallel Computing, 2005, 31(2): 185-204.
- [46] Wang C L, Gao J Z, Li L Y, et al. A multiresolution volume rendering framework for large-scale time-varying data visualization [C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Volume Graphics, IEEE, 2005: 11-223.
- [47] Knoll A M, Wald I, Hansen C D. Coherent multiresolution isosurface ray tracing [J]. The Visual Computer, 2009, 25(3): 209-225.
- [48] Suter S K, Makhynia M, Pajarola R. Tamresh-tensor approximation multiresolution hierarchy for interactive volume visualization [C]// Computer Graphics Forum. Wiley Online Library, 2013, 32(3pt2): 151-160.
- [49] Sicat R, Krüger J, Möller T, et al. Sparse PDF volumes for consistent multi-resolution volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(12): 2417-2426.
- [50] Wang C, Garcia A, Shen H W. Interactive level-of-detail selection using image-based quality metric for large volume

- visualization [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(1): 122 – 134.
- [51] Gumbau J, Chover M, Remolar I, et al. View-dependent pruning for real-time rendering of trees [J]. *Computers & Graphics*, 2011, 35(2): 364 – 374.
- [52] Piccand S, Noumeir R, Paquette E. Region of interest and multiresolution for volume rendering [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2008, 12(5): 561 – 568.
- [53] Olanda R, Pérez M, Orduña J M, et al. Terrain data compression using wavelet-tiled pyramids for online 3D terrain visualization [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(2): 407 – 425.
- [54] Ma K L, Wang C L, Yu H F, et al. In-situ processing and visualization for ultrascale simulations [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, 78: 012043.
- [55] Wang K C, Lu K W, Wei T H, et al. Statistical visualization and analysis of large data using a value-based spatial distribution [C]// *Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2017: 161 – 170.
- [56] Wei T H, Chen C M, Woodring J, et al. Efficient distribution-based feature search in multi-field datasets [C]// *Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2017: 121 – 130.
- [57] Dutta S, Woodring J, Shen H W, et al. Homogeneity guided probabilistic data summaries for analysis and visualization of large-scale data sets [C]// *IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2017: 111 – 120.
- [58] Wang K C, Shareef N, Shen H W. Image and distribution based volume rendering for large data sets [C]// *Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2018: 26 – 35.
- [59] Hazarika S, Biswas A, Shen H. Uncertainty visualization using copula-based analysis in mixed distribution models [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(1): 934 – 943.
- [60] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379 – 423.
- [61] Viola I, Feixas M, Sbert M, et al. Importance-driven focus of attention [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(5): 933 – 940.
- [62] Wang C L, Yu H F, Ma K L. Importance-driven time-varying data visualization [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(6): 1547 – 1554.
- [63] Ji G F, Shen H W. Dynamic view selection for time-varying volumes [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(5): 1109 – 1116.
- [64] Lin J. Divergence measures based on the Shannon entropy [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, 37(1): 145 – 151.
- [65] Feixas M, Sbert M, González F. A unified information-theoretic framework for viewpoint selection and mesh saliency [J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2009, 6(1): 1 – 23.
- [66] Wang C L, Ma K L. Information and knowledge assisted analysis and visualization of large-scale data [C]// *Proceedings of Workshop on Ultrascale Visualization*, 2008: 1 – 8.
- [67] El Hajjar J F, Marchesin S, Dischler J M, et al. Second order pre-integrated volume rendering [C]// *Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium*, 2008: 9 – 16.
- [68] Guetat A, Ancel A, Marchesin S, et al. Pre-integrated volume rendering with non-linear gradient interpolation [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(6): 1487 – 1494.
- [69] Lum E B, Wilson B, Ma K L. High-quality lighting and efficient pre-integration for volume rendering [C]// *Proceedings of the Sixth Joint Eurographics - IEEE TCVC Conference on Visualization*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2004: 25 – 34.
- [70] Kye H, Shin B S, Shin Y G. Interactive classification for pre-integrated volume rendering of high-precision volume data [J]. *Graphical Models*, 2008, 70(6): 125 – 132.
- [71] Pfister H, Lorensen B, Bajaj C, et al. The transfer function bake-off [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(3): 16 – 22.
- [72] Correa C, Ma K L. Size-based transfer functions: a new volume exploration technique [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(6): 1380 – 1387.
- [73] Correa C, Ma K L. The occlusion spectrum for volume classification and visualization [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1465 – 1472.
- [74] Maciejewski R, Woo I, Chen W, et al. Structuring feature space: a non-parametric method for volumetric transfer function generation [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1473 – 1480.
- [75] Correa C D, Ma K L. Visibility histograms and visibility-driven transfer functions [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(2): 192 – 204.
- [76] Wu Y C, Qu H M. Interactive transfer function design based on editing direct volume rendered images [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(5): 1027 – 1040.
- [77] Guo H Q, Mao N Y, Yuan X R. WYSIWYG (what you see is what you get) volume visualization [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 17(12): 2106 – 2114.
- [78] Zheng L, Wu Y C, Ma K L. Perceptually-based depth-ordering enhancement for direct volume rendering [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2013, 19(3): 446 – 459.
- [79] Lum E B, Ma K L. Lighting transfer functions using gradient aligned sampling [C]// *IEEE Visualization*, 2004: 289 – 296.
- [80] Kniss J, Premoze S, Hansen C, et al. A model for volume lighting and modeling [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(2): 150 – 162.
- [81] Qiu F, Xu F, Fan Z, et al. Lattice-based volumetric global illumination [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(6): 1576 – 1583.
- [82] Kniss J, Kindlmann G, Hansen C. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation widgets [C]// *Proceedings of Visualization*, IEEE, 2001: 255 – 262.
- [83] Blinn J F. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces [J]// *Proceedings of ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1982, 16(3): 21 – 29.
- [84] Krueger W. The application of transport theory to visualization

- of 3D scalar data fields [J] // Proceedings of Computer in Physics, 1990, 5(4) : 273 - 280.
- [85] Rodgman D, Chen M. Refraction in discrete ray tracing [C] // Proceedings of the Eurographics Conference on Volume Graphics. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2001 : 1 - 15.
- [86] Noordmans H J, van der Voort H T M, Smeulders A W M. Spectral volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(3) : 196 - 207.
- [87] Kindlmann G, Weinstein D. Hue-balls and lit-tensors for direct volume rendering of diffusion tensor fields [C] // Proceedings of IEEE, Visualization, 1999.
- [88] Tenginakai S, Lee J, Machiraju R. Salient iso-surface detection with model-independent statistical signatures [C] // Proceedings of IEEE Visualization, 2001 : 231 - 238.
- [89] Röttger S, Bauer M, Stamminger M. Spatialized transfer functions [C] // Proceedings of Joint Eurographics, 2005 : 271 - 278.
- [90] Huang R Z, Ma K L, McCormick P, et al. Visualizing industrial CT volume data for nondestructive testing applications [C] // Proceedings of IEEE Visualization, 2003 : 547 - 554.
- [91] Wang Y H, Chen W, Shan G H, et al. Volume exploration using ellipsoidal Gaussian transfer functions [C] // Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis), 2010 : 25 - 32.
- [92] Caban J J, Rheingans P. Texture-based transfer functions for direct volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6) : 1364 - 1371.
- [93] Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. An intelligent system approach to higher-dimensional classification of volume data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(3) : 273 - 284.