

体视化方法综述^{*}

徐夏刚, 张定华, 洪 歧

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

摘 要: 综述了体视化研究的历史及近年来体视化技术的研究现状和发展情况, 其中包括体数据的预处理、三维物体表面重建、直接体视、体图形学等各方面方法的优缺点, 并预测了体视化的未来研究趋势。

关键词: 体视化; 体数据; 面绘制; 体绘制

中图法分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2006)01-0012-04

Summerization on the Methods of Volume Visualization

XU Xia-gang, ZHANG Ding-hua, HONG Qi

(Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract: The history of research on volume visualization is reviewed in detail, as well as its perspectives and development which includes advantages and disadvantages of several fields on preprocessing of volume data, three-dimensional surface construction, direct volume rendering and volume graphics. At last, the trend of volume visualization is forecasted.

Key words: Volume Visualization; Volume Data; Surface Rendering; Volume Rendering

体视化^[1] (Volume Visualization) 技术已经有二十多年的发展历史了。在这二十多年中, 它从概念、原理、方法到硬件系统等方面得到了全面发展, 逐步形成一套完整的体系并作为一门独立学科出现。它的出现和发展丰富了可视化的理论和方法, 同时也开辟了更加广阔的应用领域。目前, 在国内外这项技术的研究与应用方兴未艾。

体视化研究^[2, 3] 最早源于 20 世纪 70 年代中期到 70 年代末, 当时计算机层析扫描技术(CT)、核磁共振技术(MRI)有着广泛的应用, 但是图像局限于是二维, 医学上迫切需要一种有效的工具来完成对人体器官、软组织和病变部体进行三维重构和显示, 从而给医学人员以直观的感觉, 因而提出了三维体视化技术。80 年代是体视化技术迅速发展的年代, 这时候出现了能够产生高分辨率低噪声三维图像的各种影像技术, 极大地促进了体视化的发展, 但由于体视化对硬件要求较高, 所以研究还处在试验阶段。随着计算机硬件技术水平的不断提高, 体视化技术研究在近十年的时间里有了突飞猛进的发展。在美国、德国、日本等发达国家的著名大学、国家实验室及大公司中, 体视化的研究工作及应用实验十分活跃, 其技术水平正在从后处理向实时跟踪和交互控制发展, 并且已经将超级计算机、光纤高速网、高性能图形工作站及虚拟现实四者结合起来成为体视化这一领域技术发展的重要方向。目前, 在发达国家已经有了商品化的体视化通用软件, 如美国 Stardent 计算机公司开发的 AVS, SGI 公司开发的 IRIS Explorer 以及俄亥俄超级计算中心开发的 apE 系统等, 以及一些专用的体视化软件, 如加拿大的 Allegro 系统、以色列爱尔新特公司、美国通用公司出产的螺旋 CT 扫描设备以及德国科学院图形学研究所和德国

气象局合作开发的 TRITON 气象数据可视化软件。虽然体视化专用硬件系统仍处在实验室研究阶段, 但是它们几乎都采用多处理、大容量内存、快速的 I/O 系统、高带宽总线及快速/带宽磁盘技术, 在试运行中都有上乘的表现, 已经具备了商品化的基本条件, 如 Cube 系统、Insight 系统、PARCUM 系统和 Voxel Processor 等。进入 90 年代后, 我们一些主要的研究单位与高等院校, 如中科院计算所 CAD 开放实验室、中科院自动化所国家模式识别实验室、浙江大学、清华大学等科研院所和高等学校相继开展了体视化的基础研究工作, 国家气象局、中科院科学与工程计算国家重点实验室等单位开展了体视化在气象云图显示、医学数据处理等方面的应用研究工作, 皆取得了一系列的研究成果。目前国内外体视化研究主要集中在医学 CT 图像的三维重构来描述人体结构内部信息, 想借助现在国内外的研究成果, 利用目前的工业 CT 在无损检测方面的应用对涡轮叶片进行数字样品体视化建模, 以探测叶片内部的三维夹杂、孔洞、裂纹等缺陷。

1 体视化发展的现状

1.1 体数据的表示

体数据在计算机里的表示方式涉及到存储需求与计算效率之间矛盾的问题。目前, 体数据的表示主要有三种方式: 原始灰度图像、二值图像或者二值化图像的简化表示以及原始灰度图像加上属性的综合表示。关于体数据的表示方式涉及到表示精度、存储量和处理时间之间的矛盾。上述三种表示各有优缺点。目前, 一个引人注目的研究方向是体数据的压缩以及对压缩的体数据的直接进行体视^[4, 5], 它能够比较好地处理存储和计算之间的矛盾。尤其是小波方法^[5], 它不仅可以进行高压缩比的压缩, 同时分解成小波基的体数据具有一些独特的

性质,使增强体数据中物体特征、减少计算量都成为可能。

1.2 体数据的分割和分类

体数据分割主要是借用计算给视觉中的分割方法,像门限法、边缘抽取、区域生长等。这些分割方法按输出结果的不同可分为两类^[6,7]:二值分割和模糊分割。二值分割结果将对每个体素作出一个肯定的二值判断,即它属于或者不属于某个物体;而模糊分割只给出每个体素属于某个物体的可能性或者某种物体占有率。在实际图像获取过程中,每个采样值可以看成是空间中一个小方体内物理属性的一个综合结果。当这个小方体内包含多种物体成分时,称这种情况为部分占有。从理论上讲,当出现部分占有情况时,二值分割就无法准确合理地区分物体,而模糊分割则能比较好地处理这种情况。进行人机交互分割^[8]是非常必要的,也是比较可行的分割方法之一。

1.3 体数据和图像之间的匹配

在体数据匹配方法中,一般都采用形变变换作为变换的模型^[9~17]。如果假设成其他几种变换模型,都在各个局部上使用。大多数匹配方法都是半自动的,即它们一般都要借助一些人为设置的标记或者通过人为调节匹配算法的参数来实现可靠的匹配。完全从图像本身提取特征并利用这些特征实现准确匹配的全自动匹配方法目前仍处于研究阶段。由于影像设备产生的畸形及成像过程中物体的运动都会造成断层图像之间的错位,因此需要用断层图像匹配对它们进行校准。同时,断层图像匹配也是三维重建和断层图像插值必不可少的步骤,主要有弹性匹配^[12~16]和形变匹配。

1.4 断层图像之间的插值

为了构造各向同性的体数据,就要在二维断层图像之间构造一些新的二维断层图像,即图像插值。最简单的图像插值方法是线性加权平均法。它只是简单地把两个原始图像的加权平均,生成插值图像的清晰度会下降,出现边界混叠现象。如果利用图像的匹配对应关系进行插值,将可以改变图像插值的准确性和合理性。

1.5 物体表面重建

三维体数据中蕴藏着丰富细腻的物体结构。物体表面重建的任务就是要恢复出蕴藏自何三维体数据中的物体结构的几何信息,以便更加方便地对物体进行定量分析、处理和显示。由于体数据本身并不包含任何几何信息,它只是某种物理属性的空间采样。因此,要从三维体数据中重建物体表面,必须先根据采样值的分布变化确定物体的边界,然后用适当的数学表示方法来描述物体表面。根据重建过程所操作的对象来分,重建方法可以分为从轮廓重建物体表面和从体素重建物体表面两种方法。轮廓重建是指在每个切片图像上抽取出物体的轮廓,然后轮廓拼接构造通过这组轮廓的物体表面^[18,19]。体素级重建方法是在物体表面通过的每一个体素内构造小面片,这种方法可以直接对原始灰度体数据进行操作,构造体数据的等值面。最有影响的体素级重建方法是 Lorensen 等人^[20]提出的移动立方体法,它能够精确地构造等值面。后来许多人改进了移动立方体法,保证了拓扑一致性,消除了重建表面出现的空隙现象,提高了等值面的表示精度。而 Herman^[21]提出的立方体法把每个“1”体素和“0”体素的交界面连接起来构成物体的

表面。

1.6 直接体视

直接体视或直接体绘制是 1988 年 Levoy^[22]等人提出的用于显示体数据的技术。它与传统图形显示方法的思想截然不同,在不构造物体表面几何描述的情况下直接对体数据进行显示。由于体数据的分割依然是一个非常难以解决的问题,无法保证后面重建结果的可靠性。直接体视就是在这种背景下发展起来的,它回避了分割和重建问题,可以对体数据所包含的物体进行显示。

2 体视化发展的趋势

体视化经过三十多年的发展,从原理、方法到系统实现形成了一套比较完善的体系。体视化的应用广泛,从 20 世纪 70 年代中期主要应用于医学领域发展到今天在地质学、空间物体学、化学、显微摄影学和工业无损探伤等诸多领域都有不同程度的应用。然而,体视化目前也面临一些问题,它们可以归纳为几点^[23~26]:没有可靠的分割方法;体数据显示速度慢,不能进行实时动态显示;关于高维的、非规则的或者向量型体数据的可视化基本上处在未知状态;对于描述烟云等的无形数据场的显示仍是一个没有很好解决的难题。将来的工作重点将放在解决这些问题上。由于分割是一个不稳定问题,不可能存在一个全自动的分割方法把分割彻底解决好,人工干预是不可避免的。问题在于如何减少人工干预量以及如何有效地进行这种干预。美国 John Hopkins 医学建立了一个三维医学图像编辑器,使用它可以方便地分割三维图像。

体数据显示速度也是一个亟待解决的问题,现在各种体数据处理硬件正处在研制当中,一些公司将在今后几年内推出它们的产品。除了从硬件角度加快体视化速度之外,体数据显示算法的研究也是一个重要方向。目前已经提出了如空间省略、自适应采样等加速体数据显示速度的方法。

关于高维的、非规则的或者向量型体数据的可视化问题,目前的主要方法是把它们转换成三维规则标量体数据后再进行显示。另外,还有几个值得注意的研究方向:实现从不同影像设备获取的体数据之间的融合,增大数据的信息量,以便更有效地分析现实世界中的物体。实现多种数据模型的混合和相互转换,即实现物体的表面几何模型和体数据离散描述模型混合在一起进行处理、分析、操作和显示,把传统计算机图形学和体视化为代表的三维图形学合并起来。未来的体视化不仅仅是“观看”体数据的工具,它将与虚拟现实技术结合起来,创造逼真的虚拟环境,让操作者在这个虚拟环境中参与对体数据的操作和改造活动。

3 体视化的发展动态

体视化的任务和目的是要把体数据中蕴藏的信息挖掘出来,并以人的视觉系统能够接受的形式即显示在人们面前。体视化技术在最近的十年里发展迅速,取得了令人瞩目的成就,但是目前它仍处于发展阶段,有许多问题有待进一步的研究加以解决。今后,关于体视化的研究会越来越深入,体视化技术的应用会越来越广泛、越来越多样化。在今后两三年之内,体视化专用硬件系统将逐步走向实用,这将会极大地促进体视化

发展。有关专家预测,到本世纪末体视化技术将从理论、方法到实用系统都会有一个新的飞跃。

3.1 体图形学

体图形学是计算机图形学领域中新崛起的一个重要分支,它在诸多方面均展示出优于传统面图形学的种种特性。尽管体图形学目前还存在许多问题,像离散问题、存储需求大、处理时间长、缺少几何信息等,但是这些问题都会随着硬件水平的提高和体视化技术的发展逐步得到解决。

体图形学将就离散体素表示的物体造型和显示问题做进一步的研究。体图形学中的物体造型是研究用离散体素表示形式来描述景物的方法,即把连续几何模型转换成体素阵列的体素化方法。基于三维扫描转换的体素化一定要保持拓扑的合理性和一致性,既不能出现拓扑自相矛盾,又要确保物体的离散拓扑和物体的连续模型具有相同的拓扑结构。除了拓扑上的要求以外,体素化还需要从表示精度、算法效率、三维离散空间及其显示的反走样等问题出发进行深入的研究。

体图形学另一个非常有潜力的研究方向是雕塑造型。离散体素表示模型所特有的复杂物体造型能力,使得体图形学在雕塑造型方面具有很大的优势。但是,离散模型不像几何模型那样容易由操作者定义和修改,因此建立一个良好的用户界面,实现快速而方便的体数据编辑则是一个值得探讨的问题。体图形学的其他研究方向还包括建立 CSG 模型、特征映射、变形、几何数据和离散采样数据的融合等。

3.2 体数据编码

今后,体数据编码将朝着基于小波的体数据压缩、特征提取、分析和增强以及显示的统一化方向发展。使用小波技术对体数据进行编码的另一个主要好处是:体数据中反映边、面等物体特征的灰度不连续之处都呈现在小波基上,因此我们可以很容易地实现对体数据中的物体特征的提取、分析和增强。关于体数据的研究将主要围绕这几个问题:压缩比、显示图像质量、速度和系统结构。

3.3 显示图像的保真度

显示图像是否真实地反映出体数据所蕴涵的结构才是最重要的,这一条应该是衡量显示好坏的首要标准。曾经一度,人们把没有走样、物体边界连续、表面光滑的显示当作高质量的显示,并以此为追求目标。自从 Tiede 等人提出显示图像保真度的问题并报告了对几种体视算法的保真度测试结果之后,人们才开始重视显示保真度问题。显示图像保真度的高低受几方面因素影响,像体数据的分割精度、表面法向量的估计精度以及浓淡模型等。今后,关于保真度问题的研究将包括两个方面,创建更加科学的测试方法以及体视算法的侧重点将由原来的重视图像的美观性转移到重视图像的保真度上去。

3.4 散乱数据可视化

以往的体视化研究主要侧重于规则体数据和整齐体数据的可视化上,而对于散乱体数据可视化的研究重视不足。由于散乱体数据不规则、结构复杂,对其进行可视化比整齐规则体数据可视化具有更大的难度。目前,关于散乱体数据可视化的研究还处在初级阶段。近年来,人们开始对曲线型体数据的可视化进行了一些探索,并改进了光线投射法,使之能够显示曲

线型体数据。曲线型体数据可视化的常规手段是,对曲线型数据进行变换,使变换后的形式更易于处理。变换方式有两种,以数据点为顶点生成一组四面体以及通过插值将不规则体数据转换成规则体数据。从散乱数据中恢复三维物体结构是另一个值得研究的课题。

3.5 具有“知识”的体数据

体视化不只是显示体数据,还应该为体数据配备某种知识,为人们提供更丰富的信息。这里我们所谈到的知识是指体数据所包含的物体的空间信息、物理属性、功能、专业名称等。设计者们把这种具有知识的体数据称作智能体数据(Intelligent Volume)。体数据知识化的应用不仅局限于医学领域,在地质分析、生物显微摄影等领域都会找到其用武之地。

体数据知识化涉及到以下问题:采用何种知识表达方式?如何进行体数据中不确定成分的知识化与可视化?什么是表示空间知识的最佳数据结构?如何将人工智能和知识库等方面的方法运用于体数据的知识化上?

3.6 体数据分割

体数据是在离散空间中对某种物理属性的一组采样。把体数据进行分割,或者把体素进行分类,将会把离散体素空间分割成若干区域,每个区域代表一个特定的物体,每个体素都被赋予一个标记,属于同一个物体的体素具有相同的标记。这就是体数据分类的任务。然而,由于分割问题的不适定性,致使该问题一直没有得到很好的解决。全自动的分割方法仍不多见,而且它们只能应用于特定领域特定种类的图像。今后对体数据分割问题的研究将朝着两个方向发展:交互式分割和自动分割。

3.7 并行处理与实时显示

体视所面临的一个现实是,体数据规则庞大,显示所需的计算量非常大。如果不从硬件角度来解决这个问题,那么只能在牺牲或者显示质量之间作出选择。如何设计更好的平行显示算法,充分发挥机器硬件的功效是这个领域的研究主题之一。而设计适合处理日数据的硬件则是这个领域的另一个研究主题。

目前,为处理体数据而设计的特殊硬件尚为数不多,多数体视算法运行在通用的并行计算机上。但是我们相信,随着硬件技术的进一步发展,以及在通用并行平台上运行体现算法经验的积累,专用的体数据并行处理硬件终究进入普通的工作站,为实现快速高质量的显示提供强有力的硬件支持。

至今为止,人们把注意力几乎都集中在规则体数据的显示上,这大概是因为规则体数据自身的格式便于并行处理。而散乱数据集并行显示算法的设计仍是一个颇具挑战性的问题。

3.8 专用的体数据硬件

在过去的几年当中,国外一些研究机构和专业厂商都曾经设计出用于体视的硬件系统,但是没有一些硬件系统得到商业上的完全承认。最早的体视硬件是为规则体数据而设计的,它采用八叉树结构来存储体数据。它的主要问题是在显示多灰度级或含丰富物体结构变化的体数据时效率仍然很低。体视化的发展也推动着显示器的一场革命。我们现在使用的显示器是二维显示器,通过浓淡的渲染才使被显示的景物具有立体

感,但这终究是二维画面。而三维显示器是一种真正具有立体效应的真三维显示器,所有的三维显示器都处在实验室研究阶段,一旦这些新一代的三维显示器进入计算机市场,无疑将会给可视化乃至所有涉及图形图像的领域带来一场技术革命。

3.9 体视化系统设计

理想的可视化系统应该是这个样子,用户只需要告诉计算机他要做什么的功能性描述,剩下的事情由计算机来做。但是,当前的可视化系统还做不到这个地步,它需要用户明确告诉它怎么做等过程描述。虽然与可视化设计器对话的方式可以在一定程度上帮助专业人员建立所需的可视化工具,但是这并不是一个有效的办法。彻底解决这个问题的方法是让可视化系统具有知识和推理机制,这样的系统可以对某个可视化任务组装最佳的工具,也可以对用户建立的工具进行品评。这方面要借助人工智能的方法。

目前有两个可视化工具自动生成方法:生成和检验方法与基于情况的推理方法。智能体视化将成为今后发展的必然趋势,因为它设计知识表达、规则、推理等人工智能问题,所以智能体视化到底能够具有多少“智能”还依赖于人工智能领域的发展。

3.10 体视化技术与虚拟现实技术的结合

虚拟现实技术是近年来兴起的一个新的研究领域,它构造一个逼真的虚拟环境。人与机器之间的交互是在声、光、力等多维信息空间中进行,使操作者有身临其境之感,使过去“以机器为中心”的操作方式变为“以人为中心”的操作方式。

体视化技术与虚拟现实技术的结合是今后发展的必然趋势。目前对体视化的研究工作主要集中在体数据的显示和分析上,对体数据的操作都是比较简单的。只有把体视化与虚拟现实技术结合起来才能真正创造出符合人操作习惯的三维工作环境,使用户可以方便而直观地对体数据所表示的世界进行操作和探索,也才能进行逼真的动态模拟。

4 结论

目前,关于体视化的研究可谓如火如荼,它的应用遍及医学、物理学、化学、地质学、显微摄像学、工业检测、航空航天和科学计算等诸多领域。体视化技术在最近的十年发展迅速,取得了令人瞩目的成就,但是它目前仍处在发展阶段,有许多问题有待于进一步的研究加以解决。今后,关于体视化的研究会越来越深入,体视化技术的应用会越来越广泛、越来越多样化。在今后两三年内,体视化专用硬件系统将逐步走向实用,这将极大地促进体视化发展。有关专家预测,在未来的几年内,体视化技术将从理论、方法到实用系统都会有一个新的飞跃。

参考文献:

[1] 唐泽圣. 三维数据场可视化[M] . 北京: 清华大学出版社, 1999.

[2] 秦绪佳. 医学图像三维重建及其可视化技术研究[D] . 大连: 大连理工大学, 2001.

[3] 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统[M] . 北京: 科学出版社, 1996.

[4] S Muraki. Volume Data and Wavelet Transform[J] . IEEE CG&A, 1993, 13(4) .

[5] T Malzbender. Fourier Volume Rendering[J] . ACM Trans Graphics, 1993, 12(3) .

[6] A Rosenfeld. Digital Picture Processing[M] . Academic Press, 1993.

[7] 徐建华. 图像处理与分析[M] . 北京: 科学出版社, 1992.

[8] H-H Ehricke, G Daiber, W Straber. The Vision Camera: An Interactive Tool for Volume Data Exploration and Navigation[C] . Visualization '93, 1993.

[9] A Gueziec. Large Deformable Splines Crest Lines and Matching[C] . Berlin: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision, 1993.

[10] A Goshtasby, D A Turner, L V Ackerman. Matching of Tomographic Slices for Interpolation[J] . IEEE Trans. on Medical Imaging, 1992, 11(4) .

[11] M Moshfeghi, S Ranganath, K Nawyn. Three-Dimensional Elastic Mathing of Volumes[J] . IEEE Trans. on Medical Imaging, 1994, 2(3) .

[12] M Moshfeghi. Elastic Matching of Multimodality Medical Images[J] . CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(3) .

[13] D J Burr. Elastic Matching of Line Drawings[J] . PAMI, 1981, 6(11) .

[14] D J Burr. A Dynamic Model for Image Registration[J] . Computer Graphics Image Processing, 1981, 15: 112-122.

[15] R Bajcsy, S Kovacic. Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations[J] . PAMI, 1989, 11(6) .

[16] D Terzopoulos, J Platt, A Barr, *et al.* Elastically Deformable Models[J] . Computer Graphics, 1987, 21(4) .

[17] W Guan, S Ma. Deformable Registration of Digital Images[J] . Computer Sci. and Tech. , 1998, 13(3) : 246-260.

[18] E Keppel. Approximating Complex Surfaces by Triangulation of Contour Lines[J] . IBM J. Res. Dev., 1975, 19: 2-11.

[19] J-D Boissonnat. Shape Reconstruction from Planar Cross Sections[J] . CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1988, 44.

[20] W E Lorensen, H E Cline. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[J] . Computer Graphics, 1987, 21(4) .

[21] H T Herman, H K Liu. Three-Dimensional Display of Human Organs from Computed Tomograms[J] . Computer Graphics Image Processing, 1979, (9) .

[22] M Levoy. Display of Surfaces from Volume Data[J] . IEEE CG & A, 1988, 8(3) : 29-37.

[23] A Kaufman. Scientific Visualization: Advances and Challenges[M] . IEEE Computer Society Press, 1994.

[24] L J Rosenblum. Research Issues in Scientific Visualization[J] . IEEE CG & A, 1994, 14(3) .

[25] A Kaufman, *et al.* Research Issues in Volume Visualization[J] . IEEE CG & A, 1994, 14(3) .

[26] J R Rossiganac, *et al.* Research Issues in Model-based Visualization of Complex Data Set[J] . IEEE CG&A, 1994, 14(3) .

[27] A Kaufman. Volume Visualization: Principles and Advances[M] . IEEE Computer Society Press, 2000.

[28] A Kaufman. Introduction to Volume Graphics[M] . IEEE Computer Society Press, 2000.

[29] S Wanohar. Advances in Volume Graphics[J] . Computers & Graphics, 1999, 23 (1) : 73-84.

作者简介:

徐夏刚(1977-), 男, 江苏无锡人, 博士研究生, 主要研究方向为体视化、图形图像处理、工业 CT; 张定华(1958-), 男, 美国机械工程师协会会员, 主任, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机辅助设计与制造、体视化技术、计算机层析成像技术、三维图像重建、数控加工技术、制造业信息化等众多领域; 洪歧(1961-), 男, 浙江东阳人, 博士研究生, 主要研究方向为体视化、图形图像处理。