110

∬─ 种新的 VolumeLIC 可视化方法

刘占平 汪国平 董士海

(中国科学院计算技术研究所智能信息处理开放实验室,北京)100080) (北京大学计算机科学技术系,北京 100871)

摘要 矢量场可视化是科学计算可视化中最具挑战性的研究课题之一.为了能在二维屏上直观显示三维矢量场,将基于纹理的LIC方法拓展到三维矢量场可视化,通过设计稀疏线噪声纹理并配合斜坡卷积核提高 VolumeLIC 图象质量,显著增强空间深度感,并采用光线投射直接体绘制方法生成 VolumeLIC 图象;另外,针对循环动画的突兀现象,提出 HRCK(Hanninged Ramp Convolution Kernel)法生成流畅的 VolumeLIC 循环动画;提出 VolumeLIC Probe 交互洞察三维矢量场内部信息.通过实例表明,本文所提方法具有良好的可视化效果,交互方便.并已应用于地幔可视化等领域.

关键词 矢量场可视化 LIC 噪声纹理 卷积核 (16) 中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)05-0470-05

A New Method of VolumeLIC for 3D Vector Field Visualization

LIU Zhan-ping, WANG Guo-ping, DONG Shi-hai

(The Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Department of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Vector field visualization is one of the most challenging research issues for Visualization in Scientific Computing, which enable an efficient insight into the physical essence behind large-scale but abstract data obtained from scientific computation and experimentation, and has been paid more and more attentions, and widely used for those areas such as Computational Fluid Dynamics, aerodynamics, atmospherical physics and meteorology analysis. This paper extended LIC to VolumeLIC for 3D vector field visualization by volume rendering 3DLICed volumetric texture. Sparse Line Noise was designed and combined with Ramp Convolution Kernel to improve VolumeLIC image, with direction and depth cueing enhanced. HRCK was presented to create smooth cyclic animation without any pulsation. VolumeLIC Probe was further proposed for interactive insight deep into 3D vector fields. Finally, Closely based on above research work, VF-VTK (Vector Field Visualization Tool Kit) was exclusively designed and developed for three practical applications, the Visualization of the mantle movement, the flow field, and the high altitude airflow field. These applications have indicated that the methods presented in this paper are convenience, efficiency and robustness in practice.

Keywords Vector field visualization, LIC, Noise texture, Convolution kernel

) 引 言 <u>「</u> 大量场可视化是科学计算可视化中最具挑战性 的研究课题之一,它以直观的图形图象显示场的运动,透过抽象数据有效洞察其内涵本质和变化规律, 广泛应用于计算流体力学、航空动力学、大气物理和 气象分析等领域.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60033020);高校骨干教师基金项目资助 收稿日期:2001-02-15;改回日期:2001-04-11 矢量场可视化的难点包括多元变量可视化、非 结构场可视化、非稳定场可视化、特征可视化以及张 量场可视化,如何在二维屏幕直观显示三维运动则 是三维矢量场可视化的关键.

6 统的矢量场可视化方法有箭头、流线、流面和 流体(Flow Volume)等.它们一般基于种子点构造 点、线、面、体中间图元,通过图元的绘制显示矢量 场.这些方法实现简单,而且可充分利用图形软硬件 加速,缺点是离散而不连续,容易混叠杂乱或漏掉关 键特征,只适合局部可视化.

基于纹理的矢量场可视化方法具有更大的优越 性,它以图象形式显示场的全貌,而且可以表现细节 变化. Van Wijk 提出了基于纹理的点噪声 (Spot Noise),沿矢量方向对点噪声滤波生成图象^[1],但该 方法不适合变化剧烈的矢量场. Brian Cabral 和 Leith Leedom 提出的线积分卷积^[2](LIC:Line Inte-G gral Convolution),对矢量场可视化具有重要意义, 并应用到图象处理、计算机艺术等领域.LIC 图象能 很好地显示运动方向,通过顺序移动周期性卷积核 的相位可以生成 LIC 动画. 基于 LIC 的改进有很 多:如 Detlev Stalling 提出的 FastLIC 基于盒形卷 积核发掘同一流线上象素间相关性,在一次流线积 分中通过差补法计算多个象素值,将 LIC 速度提高 一个数量级^[3]. Lisa Forssell 提出的 SurfaceLIC 将 LIC 推广到曲线形网格^[4],解决了曲面的动画走样 问题.Scheuerman 首先在 2D 流形切平面上计算 LIC 图象,然后基于法向量将纹理映射到流形^[5]. Hege 将 FastLIC 由盒形卷积核推广到分段多项式 卷积核^[6]. Han-Wei Shen 提出的 UFLIC 基于噪声 空间实现 LIC^[7],成功用于非稳定场可视化.

但是,LIC 向三维矢量场的拓展还非常有限,原 因在于很难通过细密的体纹理直观显示三维运动方 向^[8]

1 线积分卷积方法

LIC 方法是基于矢量方向的相关性来对噪声纹 理进行低通滤波,最终显示相关性.具体地说,LIC 选择噪声(一般为白噪声)作为输入纹理,输出纹理 的每个象素值均通过线积分卷积得到:首先基于该 象素沿矢量正、反方向对称积分得到流线,将流线上 所有象素对应的输入噪声值按卷积核参与卷积,结 果作为输出纹理的象素值(图 1).



对于输出纹理(图象)的某象素 P,以 P 为中心 沿正、反方向对称线积分得到流线 $\rho(\tau)$,其中 $-L \leq \tau \leq L$,L 为正(反)向流线长度. 正反流线长度相等可 保持对称相关性;特别地,当 τ 取 0 时其对应象素 *P*.*P* 的象素值 *T'*($\rho(0)$)是流线各点噪声纹理值的 卷积

$$T'(\rho(0)) = \frac{\int_{-L}^{L} k(\tau) T(\rho(\tau)) d\tau}{\int_{-L}^{L} k(\tau) d\tau}$$

离散形式为

$$T'(P) = \frac{\sum_{i=0}^{N} T(p_i) W_i}{\sum_{i=0}^{N} W_i}$$
 JG

其中,T 为输入噪声纹理, $T(\rho(\tau))$ 为流线上各点噪 声纹理值. $k(\tau)$ 为卷积核,表示流线各点与 P 的相 关性. p_i 为流线(包括正反两半)上的 N 个离散点, W_i 为 p_i 对 P 的贡献,即卷积核 $k(\tau)$ 在点 p_{i-1} 和 p_i 之间覆盖的面积.

1.1 3DLIC

LIC 方法可以拓展到三维矢量场——3DLIC. 3DLIC 针对 3D 噪声沿矢量方向进行线积分卷积, 具体地说沿 3D 流线方向进行低通滤波,最后输出 体纹理.

3DLIC 输出的体纹理由体素(Voxel: Volume Pixel)构成,每个体素值为 0~255 的灰度值.体纹 理不能直接显示在 2D 屏幕上,需通过体绘制才能 生成 2D 图象.

1.2 光线投射法

体绘制是基于体素的绘制方法,它不用构造等

值面,而是针对体数据直接绘制^[9].光线投射法是一种典型的基于像空间(Image Space Based)的体绘制方法(图 2).



图 2 光线投射法体绘制流程

2 一种新的 VolumeLIC 方法(

对 3DLIC 生成的体纹理采用光线投射法体绘

制能够显示三维矢量——VolumeLIC(图 3). VolumeLIC运算耗费时间和内存,相对而言,3DLIC运 算密集,占用内存不多;光线投射法运算不多,但占 用大量内存. VolumeLIC与 2DLIC有很大区别,许 多 2DLIC中行之有效的方法在 3D中不再适用.矢 量维数变多固然增加了可视化难度,而噪声设计、卷 积核选取及体绘制技术却都可能影响可视化的最终 效果.基于白噪声和盒形卷积核的 VolumeLIC,由 于体纹理过于细密,导致运动方向不明显、空间深度 感不强,即使调节阻光度系数仍难以改善效果(图 4 (a)和图 4(b)).



(b) 白噪声+盒形卷积核

图 3 VolumeLIC 流程



(a) 白噪声+盒形卷积核

图 4 几种 VolumeLIC 图象效果比较

2.1 稀疏线噪声的选择

鉴于白噪声过于细密,可以设计稀疏噪声来扩 大方向信息的"表现空间",特别地,如果噪声具有局 部各向异性,则还会增强表现效果.稀疏噪声不仅具 有全局噪声特性,即散乱无规则分布,而且具有自己 的局部特性——呈特定形状.这种局部形状可称为 为"噪声群"(Noise Cloud).稀疏噪声的构造分以下 几步:

(1)确定噪声群尺寸:每个噪声群覆盖多少体素.

(2)设计噪声群:塑造局部特性,如各向异性.

(3)分布噪声群:众多噪声群稀疏地、规则地排 列以形成体纹理.

(4) 抖动噪声群: 确保全局噪声特性.

基于稀疏椭圆噪声和斜坡卷积核的 VolumeL-

IC 图象运动方向明显,但空间深度信息不足,不能 显示场的内部信息(图 4(c)).主要原因是噪声群尺 寸较"大",稀疏度不足.基于稀疏线噪声和斜坡卷积 核的 VolumeLIC,不仅运动方向明显,而且空间深 度感增强(图 4(d)).

(d) 稀疏椭圆噪声+斜坡卷积核

2.2 动画突变的消除

(c)稀疏椭圆噪声+斜坡卷积核

顺序移动周期性卷积核的相位能够生成多帧 VolumeLIC 图象,连续播放即可形成动画;盒形卷 积核可采用卷积核平移和帧混合技术生成动画; Hanning 卷积核本身即是周期性函数,可直接生成 动画(图 5);斜坡卷积核拓展成周期性函数后亦可 生成动画(图 5),但是循环播放时会出现突变现象. 突变发生在前一周期结束与下一周期开始之际,突 变现象由斜坡卷积核的形状所决定,即斜坡卷积核





图 5 斜坡卷积核与 Hanning 卷积核

在周期开始与结束处取值不等,由于其值在 0、1 之 间突变,从而造成突变瞬间发生运动方向逆转. 突变 问题限制了动画的长时间循环播放,影响了可视化 效果. 斜坡卷积核 *K*_{Ramp}(τ)和 Hanning 卷积核的表 示式分别为

 $K_{\text{Ramp}}(\tau) = \frac{(L-\tau)}{2L}$ $K_{\text{Hanning}}(\tau) = \frac{\cos(c\tau) + 1}{2} \int \frac{\cos(d\tau + \varphi) + 1}{2}$

式中, $c = \frac{\pi}{L}$;d = cf,其中,f为频率; φ 为相位.

对拓展后的斜坡卷积核进行滤波可以解决突变 问题. 高斯函数虽具有这种功能,但形式过于复杂,难 于得到显式积分表达式,从而直接妨碍 3DLIC 的计 算. Hanning 卷 积 核 具 有 低 通 滤 波、加 窗 (Windowing)和周期特性,而且形式简单,适合积分 运算,因此选用 Hanning 卷积核对斜坡卷积核滤波 —— HRCK (Hanninged Ramp Convolution Kernel),即 $K_{HRCK}(\tau) = K_{Ramp}(\tau)K_{Hanning}(\tau)$.基于稀疏 线噪声和 HRCK 卷积核可以生成流畅的循环动画, 从而解决了动画突变问题,而且空间深度感较强.

2.3 VolumeLIC 探针方法

为了增强三维矢量场可视化效果,最好能够直接洞察场的内部. VolumeLIC 探针方法以视线为 "刀",采用剖切方法随视线自动改变剖切部位,而且 上下、左右视野可调(图 6),即每当视线改变时对 3DLIC 体纹理作切割——将被切割区域的体纹理 清零,然后照例进行光线投射体绘制.

基于矢量场可视化新方法与关键技术的深入研究和探索^[10],将上述 VolumeLIC 方法集成其中 (图 7).设计并开发了矢量场可视化工具集 VF-VTK,VF-VTK 应用于地幔运动可视化、流体 运动可视化和高空气流运动可视化三个实例,效果 良好.





图 6 采用探针方法洞察三维场内部信息



图 7 VolumeLIC 集成在 VF-VTK 中并应用于实例

3 结 论

本文给出了一种将LIC 拓展到三维矢量场可 视化的方法,即首先利用光线投射直接体绘制法来 生成 VolumeLIC 图象,再通过噪声设计、卷积核选 取等步骤,来显著增强 VolumeLIC 的运动方向信息 和空间深度感.提出了 HRCK 法生成流畅的 VolumeLIC 循环动画,解决了动画突变问题.另外,还 提出 VolumeLIC 探针交互探测三维场内部结构,并 开发了一个矢量场可视化工具集 VF-VTK.通过实 例,说明了提出方法的有效性和可行性.VolumeLIC

110

方法计算密集而且耗费内存,但随着硬件加速的日 益增强,尤其是软硬件并行算法的进一步研究,其将 具有很大的发展潜力.

参考文献

- Jarke J. Van Wijk, Spot Noise: Texture synthesis for data visualization. Computer Graphics, 1991,25(4):309~318.
- 2 Brian Cabral, Leith Leedom. Imaging vector fields using line integral convolution. Computer Graphics, 1993, 27 (4): 263~270.
- 3 Detlev Stalling, Hans Christian Hege. Fast and resolutionindependent line integral convolution. Proceedings of SIGGRAPH'95,1995;249~256.
- 4 Lisa K Forssell. Visualizing flow over curvilinear grid surfaces using line integral convolution. Proceedings of IEEE Visualization 94, 1994;240~247.
- 5 Gerik Scheuermann, Holger Burbach. Visualizing planar vector fields with normal component using LIC. Proceedings of IEEE Visualization 99,1999:312~318.
- 6 Hans-Christian Hege, Detlev Stalling, Fast LIC with piecewise polynomial filter kernels. Mathematical Visualization-Algorithms and Applications, H. C. Hege, K. Polthier (Eds), Springer-Verlag, 1998:295~314.
- 7 Han-Wei Shen, David L Kao. UFLIC: A line integral convolution algorithm for visualizing unsteady flows. Proceedings of IEEE Visualization 97, 1997:317~322.

8 Victoria Interrante, Chester Grosch. Strategies for effectively visualizing a 3D flow using volume line integral convolution. Proceedings of IEEE Visualization 97, 1997:421~424.

- 9 Arie Kaufman, Ricr Arila, Willian Lorensen et al. Volume Graphics. ACM SIGGRAPH Annual Conference, SIGGRAPH'99 Course Notes, Los Angeles, California, 1999.
- 10 刘占平. 矢量场可视化若干关键问题研究 [博士论文]. 北京, 2000. **11**

刘占平 1970年生,2000年获北京大 学计算机科学技术系软件专业博士学位. 研究兴趣有计算机图形学、虚拟现实、科学 计算可视化、图象处理与重建等.发表论文 10余篇.

汪国平 1964 年生,1997 年于复旦大学获博士学 位,副教授,参加完成国家级项目近十项.现主要研究方 向为计算机图形学、虚拟现实和可视化等.发表论文 30 余篇.

董士海 1939 年生,教授,博士生导师,北京大学 计算机系多媒体与人机交互研究室主任,获国家教委科 技进步奖等奖项多项.现主要研究方向为多通道人机界 面、虚拟现实和可视化等.论文 100 余篇,专著4部.

TTG