

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **2**  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年2月 第17卷 第2期(总第190期)

## 目次

### 综述

内容感知图像缩放技术综述 ..... 施美玲,徐丹(157)

### 图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 ..... 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 ..... 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 ..... 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 ..... 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 ..... 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

### 图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 ..... 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 ..... 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 ..... 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 ..... 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 ..... 潘林,魏丽芳,郑炳锜,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 ..... 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 ..... 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 ..... 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 ..... 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 ..... 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

### 图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的3维物体识别 ..... 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 ..... 王丽英,宋伟东(279)

## 计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 ..... 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

## 虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 ..... 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

# 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 2 期

2012 年 2 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱: jig@irsa.ac.cn  
电话: 010-68407995 010-82614429  
网 址: www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail: jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

## Contents

### Review

Survey on content-aware image resizing techniques ..... Shi Meiling, Xu Dan (157)

### Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity ..... Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling ..... Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication ..... Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion ..... Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data ..... Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

### Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space ..... Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment .....  
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation .....  
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut ..... Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion ..... Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set ..... Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection ..... Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU ..... Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF ..... Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images .....  
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

### Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images .....  
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data ..... Wang Liying, Song Weidong (279)

### Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve ..... Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

### Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method ..... Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0293-08

论文引用格式: 秦绪佳, 张勤锋, 陈坚, 郑红波, 徐晓刚. GPU加速的台风可视化方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 293-300

# GPU加速的台风可视化方法

秦绪佳<sup>1</sup>, 张勤锋<sup>1</sup>, 陈坚<sup>1</sup>, 郑红波<sup>1</sup>, 徐晓刚<sup>2,3</sup>

1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310032; 2. 大连舰艇学院装备系统与自动化系, 大连 116018;  
3. 浙江大学CAD&CG国家重点实验室, 杭州 310058

**摘要:** 自然现象的可视化是计算机图形学和虚拟现实领域的重要研究内容。对传统光线投射算法分析的基础上进行改进, 提出基于球壳体的光线投射算法。将GPU运用于球壳体数据场的体绘制, 设计了基于球壳体数据场的顶点着色程序和像素着色程序。同时, 对台风源数据格式进行解析, 生成了用于台风可视化的体数据, 采用提出的算法实现了台风云层和因子的可视化。实验结果表明, 本文基于GPU的球壳体光线投射算法在球体表面较好地实现了实时台风可视化效果。

**关键词:** GPU加速; 台风可视化; 光线投射算法; 球壳体

## GPU accelerated typhoon visualization method

Qin Xujia<sup>1</sup>, Zhang Qinfeng<sup>1</sup>, Chen Jian<sup>1</sup>, Zheng Hongbo<sup>1</sup>, Xu Xiaogang<sup>2,3</sup>

1. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;  
2. Department of Equipment System and Automation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;  
3. State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

**Abstract:** The visualization of natural phenomena visualization is an important research area in computer graphics and virtual reality. In this paper we analyze and improve the traditional ray casting algorithm by proposing a graphics processing units(GPU)based spherical shell ray casting algorithm. GPU are used in the spherical shell data field volume rendering, and spherical shell. Vertex shader and pixel shader programs for spherical shell data field rendering are designed. The format of the typhoon source data is analyzed and the typhoon volume data to be visualized is generated. The visualization of typhoon clouds and factors are implemented by using the proposed algorithm. Experiment results show that a good real-time visualization of a typhoon is obtained by the GPU-based spherical shell ray casting algorithm.

**Key words:** GPU acceleration; typhoon visualization; ray casting algorithm; spherical shell

## 0 引言

科学计算可视化<sup>[1]</sup>(ViSC)的概念在1986年召开的美国科学基金会的一次研讨会上被提出后, 便很快发展成为一门新的学科。科学计算可视化融合

了计算机图形学、计算机辅助设计与交互、计算机网络、视频等技术, 并已经被成功应用于医学、天文学、材料科学、人类学和考古学、地址勘探和地震预测、气象分析、工业无损探伤、航空航天等诸多领域, 它在分析过程中带来的直观性、准确性等给科学工作者们带来了许多方便, 使科学计算可视化已经

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61075118, 60975016); 浙江省自然科学基金项目(Y1100880); 浙江大学CAD&CG国家重点实验室开放课题项目(A0906)

第一作者简介: 秦绪佳(1968—), 男, 教授, 2001年在大连理工大学获机械制造及其自动化专业博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理。E-mail: qxj@zjut.edu.cn

成为图形学重要研究方向和图形科学的重要领域<sup>[2]</sup>。

在气象预报及仿真领域,科学计算可视化将云层、雨雪、洋面、台风等大量气象数据转换为直观的图形或图像,在屏幕上绘制出某一时刻的云层形态及其随时间的变化状况、雨雪的动态效果、洋面的运动状态以及台风的压强、温度等信息,使研究者能够直观地了解在某一时刻、某一地点的气象状况,有助于人们理解气象状况的演化规律并对未来天气状况做出更为准确的预测。

从 20 世纪 70 年代开始,国外一些学者在台风可视化方面做了有益的探索与尝试。美国国家标准协会(ANSI)<sup>[3]</sup>和澳大利亚标准协会(SAA)<sup>[4]</sup>采用模拟台风风场的方法编制设计风速图。Vickery 等人<sup>[5]</sup>先后从流体力学和热力学出发建立了台风的风场模型,包括动力模型和经验统计模型。Sharma<sup>[6]</sup>和 Amano<sup>[7]</sup>基于实际测量探讨了台风的风速剖面、阵风因子、紊流度和积分尺度的关系与规律。Healey 等人<sup>[8]</sup>采用颜色可视化方法模拟了 3 维台风,但台风的绘制仍相当符号化。朱震毅<sup>[9]</sup>从台风风场模型出发,结合实时卫星云图资料,对台风轮廓线、强度、中心移动路径和移动速度进行了模拟,再现了台风的运动及其变化。王长波等人<sup>[10]</sup>从台风的物理特性出发,建立台风模型,并模拟了台风风场与物体的交互作用。

目前,科学计算可视化主要通过面绘制和体绘制两类方法进行实现。其中前者可以生成比较清晰的等值面图像,而且可以利用现有的图形硬件加速多边形绘制的功能,使图像生成和变换的速度加快,但不能反映原始体数据的全貌和细节,缺乏其内部信息的展现;而后者则依据 3 维体数据,将所有细节同时展现在 2 维图片上,其对于需要展现体数据场内部信息或揭示体数据场内部变化规律的体数据进行绘制有较大优势,能够生成 3 维数据场的高质量整体图像及其细节,同时便于并行处理。

从上述对台风可视化的研究状况可以看出,目前对于台风的模拟多集中在数值模拟方面,主要通过建立台风的物理模型、风场模型、温度模型等一系列模型<sup>[11]</sup>,以及研究制约台风形成和发展的各种物理因素的相互作用来模拟台风结构和运动路径等。为此,采用光线投射体绘制方法对台风体数据的可视化进行研究,从而展现台风的 3 维形态及其内部信息,实现对台风云层与台风因子的可视化。由于

台风依附于地球表面运动,因此绘制算法应适应于球壳形的体数据。要实现台风动态绘制,对算法的效率要求较高,采用 GPU 进行加速,提出了基于 GPU 的球壳体光线投射算法。

## 1 光线投射算法的改进

### 1.1 光线投射算法

光线投射算法最先由 Levoy<sup>[12]</sup>于 1988 年提出,是典型的直接体绘制算法之一。光线投射算法如图 1 所示,从屏幕图像的每一个像素,沿固定方向(图 1 中视线方向)发出一条光线,称投射光线,这条光线穿过 3 维体数据集,对与投射光线相交的  $n$  个等间距的体数据点进行重采样,并对重采样点采用从前向后或从后往前的方式进行颜色混合,将混合后的颜色作为该像素的最终颜色值,从而实现 3 维重建<sup>[13]</sup>。

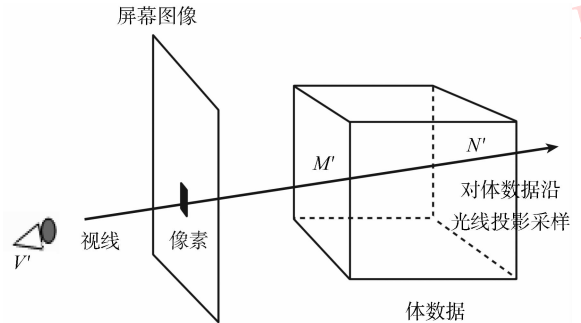


图 1 光线投射法原理

Fig. 1 Principle of ray casting algorithm

从光线投射算法的原理可以看出,该体绘制过程时间主要消耗在遍历体数据和颜色合成等操作上。传统的基于 CPU 的光线投射算法,由于没有 GPU 的运算支持,因而绘制性能低下。为此人们针对光线投射算法提出了多种优化方法,如减少光线采样法<sup>[14]</sup>,减少体数据采样点数目法<sup>[15]</sup>,提前光线终止法<sup>[16]</sup>、图形硬件辅助加速<sup>[17]</sup>等方法进行优化。

### 1.2 改进的基于球壳体光线投射算法

光线投射算法作为一种经典的体绘制算法,能很好地展现台风的 3 维形态,又能通过 GPU 对其实现过程进行加速,为此,选择光线投射算法进行台风的体绘制。同时,台风在地球表面运动与演化时其整体形态接近于一种球壳体,而传统的光线投射算法要求被渲染空间为立方体,如图 1 所示,如果在立方体空间内对台风进行渲染,台风无法紧贴球体表

面。采用球壳体绘制能更好体现台风形态,所以适合在球壳体区域内对台风进行绘制。为此,对传统光线投射算法进行了改进,提出基于球壳体的光线投射算法,就是在坐标系转换过程中采用了球体坐标系。

基于 GPU 的球壳体光线投射算法在顶点着色器中,首先将远点纹理坐标转换到球体坐标,随后,对远点坐标与世界-视点-投影坐标系转换矩阵相乘,获得屏幕坐标系下远点坐标;再根据相机坐标求出近点坐标,这样就能求出该条光线的采样开始点与终止点;通过屏幕上所有像素点的循环计算,最终获得球壳体状体数据场,并在该数据场中实现采样与绘制。图 2—图 3 显示了球壳体数据场示意图、球壳体数据场的实际绘制效果图。

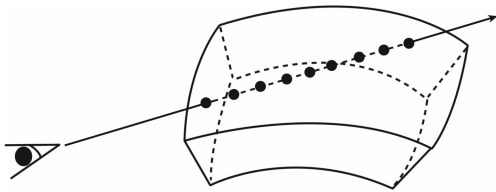


图 2 球壳体状体数据场  
Fig. 2 Spherical shell data field

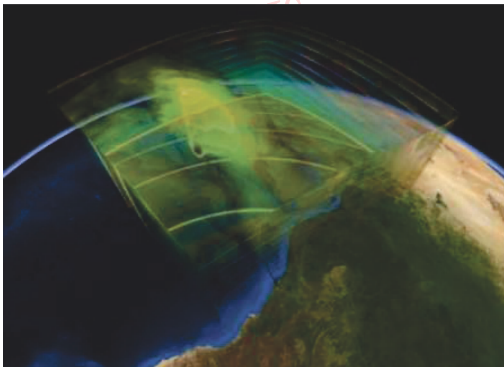


图 3 基于球壳体光线投射算法绘制效果  
Fig. 3 Rendering result of GPU-based spherical shell ray-casting algorithm

基于球壳体光线投射算法关键部分的实现伪代码表示如下:

```
VS_OUTPUT 球壳体坐标输出 ( VS_INPUT)
```

```
{
```

```
VS_OUTPUT  $O = (VS\_OUTPUT)0;$ 
```

将远点坐标  $O.far$  转换到球体坐标,再转换到屏幕坐标;

```
将远点坐标与  $matWVP$  矩阵进行相乘  $mul()$ ;  
计算视点  $camera\_pos$  到远点  $O.far$  的距离  $O.ray$ ;  
计算视点  $camera\_pos$  到近点  $O.near$  的距离  $near\_dis$ ;  
计算近点坐标  $O.near$  值;  
return  $O$ ;  
}
```

## 2 基于 GPU 的光线投射算法

传统的光线投射算法在 GPU 上实现加速处理的关键是能够利用 GPU 完成对体数据的遍历、采样和计算等,并将得到的采样值进行混合,以产生最终的重建结果<sup>[18]</sup>。基于 GPU 的光线投射算法步骤如图 4 的流程图所示。

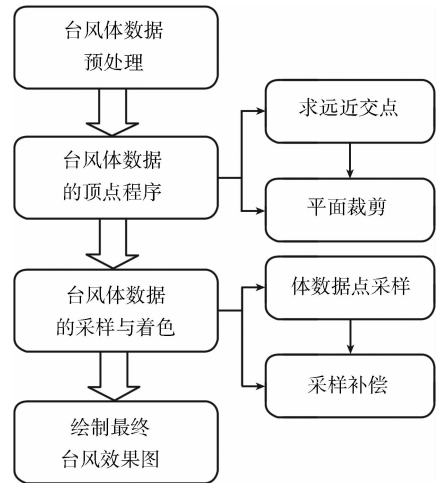


图 4 基于 GPU 的球壳体光线投射算法流程图  
Fig. 4 Flow chart of GPU-based ray casting algorithm

### 2.1 台风体数据预处理

采用的体数据源数据集来源于海军某部,用于台风因子可视化的数据集为其中的  $Rain$  (台风雨)、 $P$  (压强)、 $T$  (温度)、 $U$  (东西速度分量) 以及  $V$  (南北速度分量) 4 个数据集。每个数据集按不同时刻来采样,从 0 时刻开始,每隔 6 小时采样一次,共采样 13 次,时间跨度为 72 小时。同时,在每个时刻还按大气压强来采集的,从台风压强的 200 ~ 1 000 hPa 分 6 个等压面进行采集,每两个相邻等压面间压强差为 100 ~ 200 hPa 不等的 6 个数据;因此,采样结果共生成  $13 \times 6$  组格点数据,数据大小为  $309 \times 280$ ,每个格点数据为实型,大小为 4 个字节。其中,格点数据还存在偏移量,其数据集格式如图 5 所示。

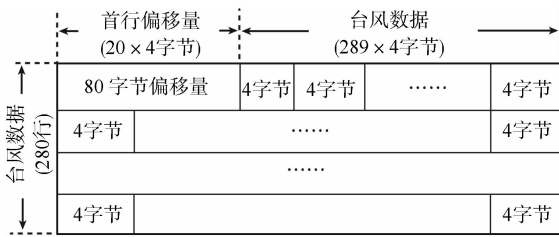


图5 台风源数据集格式

Fig. 5 Format of typhoon source data

在进行体绘制时,分别将每一个体数据点的压强、温度、 $U$  速度分量(西东方向)、 $V$  速度分量(南北方向)映射为 3 维纹理的 RGB 值与 Alpha 值。图6—图7 显示了台风源数据  $Rain$ 、 $U$  分量中 0 时从 200 ~ 1000 hPa 的 6 个等压面(等势面)的映射形成的台风云层图。其中图 6 为  $Rain$  数据集经上述映射机制形成的台风云层纹理图。图 7 为速度分量  $U$  数据集经映射机制形成的台风云层纹理图。

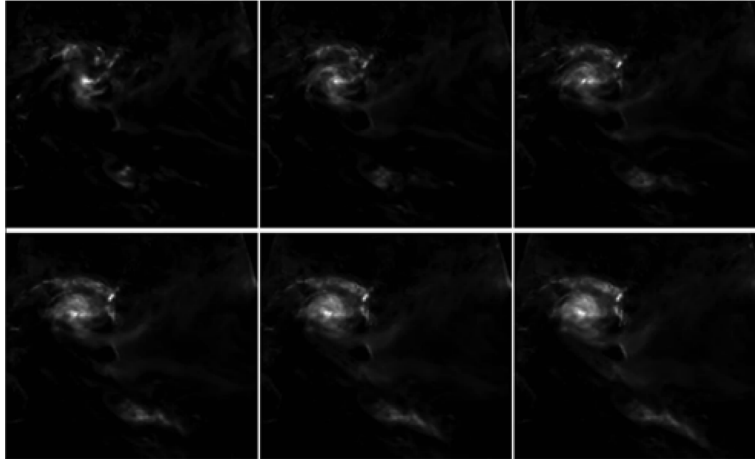


图6  $Rain$  数据集映射形成的台风云层纹理图

Fig. 6 Typhoon cloud textures mapped by  $Rain$  data set

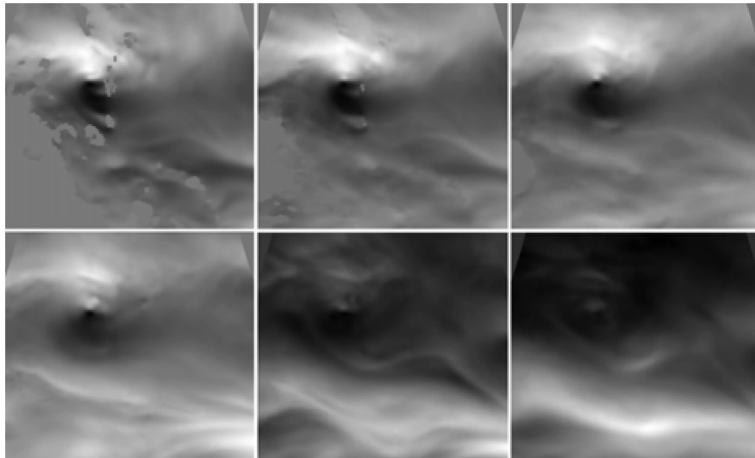


图7  $U$  数据集映射形成的台风云层纹理图

Fig. 7 Typhoon cloud textures mapped by  $U$  data set

由台风源数据得到的台风某因子的等势面数据,在映射为 3 维纹理过程中,采用线性插值方法进行插值计算:

$$V = V_0 \times (1 - r) + V_1 \times r \quad (1)$$

式(1)中  $V$  是当前点的值,  $V_0$  是下层等势面的值,  $V_1$  是上层等势面的值,而  $r$  是当前点所在的位置。

## 2.2 台风体绘制的顶点着色器程序

在 GPU 着色语言 HLSL 中顶点着色器单元主要任务是把体素的局部坐标系转换到齐次裁剪空间,主要经过世界变换、取景变换以及投影变换。这些变换分别由世界变换矩阵、取景变换矩阵和投影变换矩阵来完成。同时,顶点着色器也对体素进行

光照处理,处理流程如图8所示。

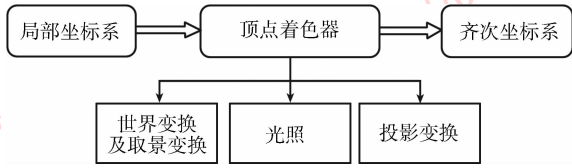


图8 顶点着色器处理流程

Fig.8 Flow chart of vertex shader

在台风绘制中,首先根据台风体数据所在区域,创建顶点与索引缓存,并进行空间变换,产生一个包裹着球体表面的球壳体网格。然后,对球壳体3维网格进行背面剔除。顶点着色器程序主要实现对3维数据场中体素的坐标进行转换以及视域体各平面的裁剪等工作。其主要步骤如下:

1)计算投射光线与球壳体内壳或者边缘的交点(图9中点 $N'$ )

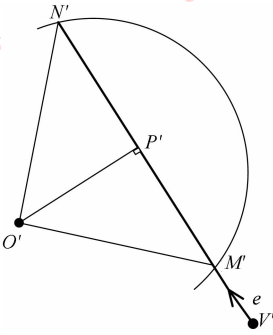


图9 射线与球体相交

Fig.9 Intersection of a ray and the sphere

$N'$ 点即是遍历的终点。因为在剔除背面时朝内一面保留下来,因此只要通过光栅化即可得到这一点坐标。然后将该点纹理坐标转换到经纬度坐标,转换公式为

$$\begin{cases} longitude = Texcoord.U - 0.5 \times Stride.X \\ latitude = Texcoord.V - 0.5 \times Stride.Y \\ attitude = Texcoord.W \times Stride.Z \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $Texcoord$  为光栅化点的纹理坐标,  $Stride$  为台风在地球表面的经纬度跨距;其中纹理坐标各个分量的取值范围为(0,1)。而球体坐标中  $longitude$ 、 $latitude$ 、 $attitude$  分别代表经度、纬度和海拔。跨距中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  则分别代表经度、纬度和海拔跨距。

2)计算投射光线与球壳体外壳或者边缘的交点(图9中点 $M'$ )

如图9所示,用摄像机位置 $V'$ 点到 $N'$ 点的射线

与球外壳求交点 $M'$ 。图中 $O'$ 点为球体球心, $r$ 为球壳体外壳半径。

为此,必须先求出 $V'$ 点到 $M'$ 和 $N'$ 点的距离,由于 $M'$ 点是遍历起点, $N'$ 点是遍历终点, $V'$ 到 $M'$ 点的距离 $S_1$ 和 $V'$ 到 $N'$ 点的距离 $S_2$ 必定有关系: $S_1 < S_2$ 。

$M'$ 和 $N'$ 的计算公式为

$$\begin{cases} V'M' = V'P' + P'M' \\ V'N' = V'P' + P'N' \end{cases} \quad (3)$$

若先求出 $e$ ,即 $V'N'$ 的规格化向量:

$$e = \frac{V'N'}{|V'N'|} \quad (4)$$

则可求得

$$|V'P'| = e \cdot V'O' \quad (5)$$

$$|P'M'| = \sqrt{r^2 - |O'P'|^2} \quad (6)$$

$$|P'M'| = |P'N'| \quad (7)$$

由简单的线性代数可得

$$|P'M'| = |V'O' \times e| \quad (8)$$

这样就能得到 $M'$ 的坐标。而 $N'$ 的坐标在先前的计算中已经得到,可以直接使用。

3)平面裁剪 通过投射光线起止点的经纬度值来确定需绘制的区域大小分别使用视域体上下左右前后6个方向的裁剪平面对体数据场进行裁剪,将区域外的部分裁减掉。

在绘制之前,先初始化渲染区域的经纬度跨度;在实时绘制时根据屏幕实际经纬度跨度和视角方向,进行可见性判断,采用上述方法进行不必要绘制场景的剔除,从而将需要绘制的纹理加载到GPU中,实现场景加速绘制的优化处理。

### 2.3 台风体绘制的采样与着色

像素着色器程序是整个光线投射算法的核心之一,主要实现沿投射光线对体数据的遍历、采样、迭代和计算,其具体步骤如下:

1)体数据点的采样 在采样过程中,首先需要将被采样点的世界坐标转换为球体坐标,转换公式为

$$\begin{cases} longitude = atan2(pos.y, pos.x) \\ latitude = arcsin(pos.z/r) \\ attitude = r - radius - low \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中  $longitude$ 、 $latitude$ 、 $attitude$  分别为球体坐标的经度、纬度和海拔, $r$ 为世界坐标系中点到球体中心的距离值, $pos$ 为世界坐标系中点的坐标值。其

中, *attitude* 的方向为从沿球心方向并与 *longitude* 与 *latitude* 所在平面垂直方向。然后将球体坐标转换为纹理坐标, 根据获得的纹理坐标值来确定需要加载进入 GPU 的 3 维纹理范围; 同时以获取被采样点 ARGB 值, 其转换公式可通过反求式(2)获得。而对于两个不同时刻之间的台风云层的状态, 则采用简单的依时间变化的线性插值来计算, 其计算公式为

$$State = State_0 \times (1 - \delta) + State_1 \times \delta \quad (10)$$

式(10)中  $State_0$  与  $State_1$  分别为两个时刻的状态值,  $State$  为当前时刻状态值,  $\delta$  为时间因子。

最后通过颜色传输函数将采样点颜色混合, 得到像素的最终颜色值。将(0, 1)范围内的值分别映射为不同颜色值, 即

$$C = f(State) \quad (11)$$

式中,  $State$  是状态值, 当渲染压强时, 就是压强; 而渲染温度时, 则是温度。  $C$  是对应的颜色。

2) 采样补偿 将补偿系数与颜色传输函数值相乘来补偿因采样点的不足以及离散化后造成的采样点的不连续, 具体补偿系数为

$$c = \frac{fmode(1, step\_rate)}{step\_rate} \quad (12)$$

式(12)中  $c$  为补偿系数,  $fmode(\cdot)$  函数为浮点数取余函数,  $step\_rate$  为采样步长因子。

## 2.4 台风云层 3 维效果的最终绘制

在像素着色器计算出顶点最终颜色值后, 采用光线投射算法由前向后的方式进行了合成, 并采用提前光线结束法对合成过程进行加速, 其具体实现步骤如下:

1) 定义采样步长。根据光线与体数据场的远近交点之间的距离除以采样数目 *account* 来确定采样步长。

2) 定义初始不透明度  $d$  为 1。

3) 采样与图像合成。通过颜色传输函数将采样点信息转化为 ARGB 值; 对采样点的 ARGB 值进行累加计算; 将步骤 2) 中定义的不透明度值  $d$  减去当前的 *Alpha* 值; 初始采样次数 *account* 减 1。

4) 判断采样次数与不透明度值。若采样次数小于步骤 1) 中定义的采样数目 *account* 且不透明度值  $d$  大于 0, 则转到步骤 3); 否则转到步骤 5)。

5) 返回该条光线上的采样结果, 即返回累加的得到的最终颜色值和不透明度值。

## 3 实验结果与分析

在 PC 机上实现了本文算法, 实验编程环境为 Visual Studio 2005 和 DirectX 9. 0; PC 机配置为: CPU 为双核 Intel (R) Core (TM2) Duo E7400, 内存为 2. 0 GB, 显卡芯片为 GeForce8400 GS, 显存为 512 M; 展现平台 3 维地理信息系统 WorldWind 1. 40。

### 3.1 台风云层可视化结果

实验中实现了按时间序列的台风云层变化。通过对图 6 所示台风云层纹理图经真彩色映射后组织形成的 3 维纹理的渲染绘制, 图 10 显示了连续 4 个采样时刻的台风 3 维形态变化图。云层经过真彩色映射后中间红色部分标识了台风眼区域, 当远离台风眼部分, 映射颜色逐渐从深蓝色过渡到浅蓝色, 直至白色, 且展现了台风云层随时间演变的过程。

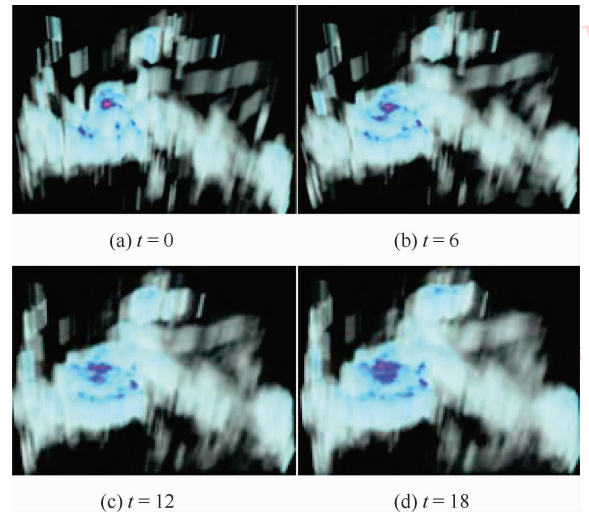


图 10 连续 4 个时刻的台风 3 维形态变化图

Fig. 10 Typhoon 3D visualizations at four continuous moments

同时, 通过对图 7 所示的台风云层纹理图组织形成的 3 维纹理图的渲染绘制, 图 11 显示从俯瞰且近距离的角度给出了连续 4 个采样时刻台风眼的形态变化。云层中心的空洞为台风眼, 周边灰色云层绕其旋转, 同时, 台风眼也随时间演变。

### 3.2 台风因子可视化结果

对台风源数据的各因子在球壳体表面上进行绘制, 图 12 所示为对台风的压强、温度、西东向速度分量和南北向速度分量 4 个因子的可视化效果, 其中不同的颜色代表了不同的等值面值。

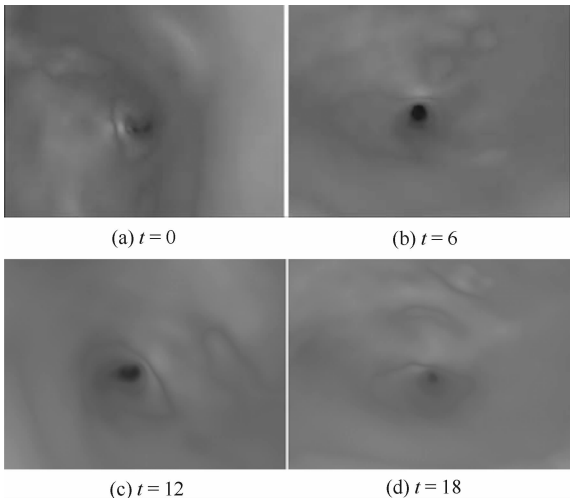


图 11 连续 4 个时刻台风眼内部效果图  
Fig. 11 Internal visualization of typhoon center at four consecutive times

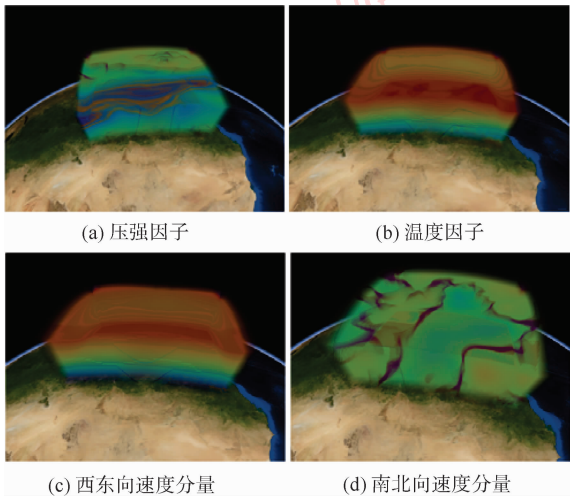


图 12 台风各种因子球壳体可视化  
Fig. 12 Visualization on spherical shell: different typhoon factors

在开发的实验系统中,可以通过对交互工具的调色板与传输函数模块的控制,来突出显示台风某一等值面值段的压强。图 13 显示了两个不同时刻台风黄色色系等值面压强值的变化趋势。

本文实验中,除了实现对某一时刻台风因子的可视化(见图 12)外,还实现了按时间序列的台风因子变化。图 14 显示了连续 4 个采样时刻的台风压强因子 3 维形态变化图。其中暖色系等值面的压强值较大,冷色系等值面的压强值较小,且 0 时刻表现为台风压强最强时,随时间变化,压强值逐渐减弱,表现为暖色系颜色逐渐转淡。

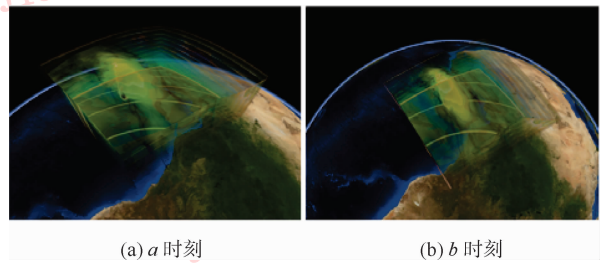


图 13 两个不同时刻台风黄色色系等值面压强突出显示图  
Fig. 13 Yellow isosurfaces figure of typhoon pressure at two different times

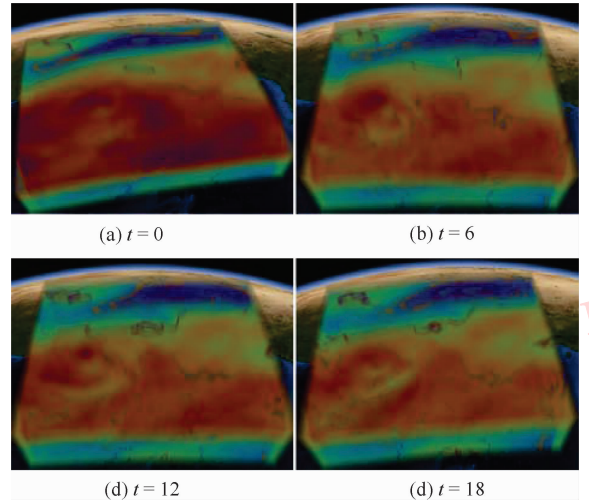


图 14 连续 4 个时刻台风压强因子 3 维可视化效果图  
Fig. 14 3D visualizations of typhoon pressure factor at four consecutive times

### 3.3 实验结果分析

为了体现 GPU 对光线投射算法的加速性能,将 CPU 上的光线投射算法和基于 GPU 的立方体与球壳体光线投射算法的绘制的效率进行了比较,在采样精度、强度因子、海拔等一系列条件相同的情况下,两种方法的绘制效率如表 1 所示。

表 1 绘制效率对比  
Table 1 Rendering efficiency comparison

	帧/s		
	CPU 光线投射法	GPU 立方体 光线投射法	GPU 球壳体 光线投射法
采样精度 8	6	24	21
采样精度 20	5	21	19

由表 1 可知,基于 GPU 作为计算平台的两种光线投射算法在性能上远远超越了 CPU 上的算法,而基于 GPU 的两种光线投射算法性能基本一致。而在高采样精度 20 的情况下球壳体光线投射算法绘制效

率已达到 19 帧/s,可基本满足实时性的需求,因此采用球壳体绘制方法进行台风可视化是可行的。

台风可视化的立方体绘制与球壳体绘制在相同条件下,绘制帧速率差异产生的主要原因是两者坐标系转换效率的差异,前者是从纹理坐标系转换到模型坐标系,再转换到屏幕坐标系;后者是从纹理坐标系转换到球体坐标系,再转换到屏幕坐标系。显然后者计算量稍大。

## 4 结 论

台风可视化是气象可视化研究的重要内容。根据台风云层在地球表面的实际形态,将传统的光线投射算法改进为基于球壳体的光线投射算法,并在 GPU 上对该算法进行了实现。算法将台风体数据映射成 3 维纹理;建立顶点与索引缓存,创建包裹球体表面的球壳体网格,对球壳体网格进行背面剔除;在 GPU 中采用光线投射法对体数据进行遍历、采样和计算;进而在球壳体表面实现了制约台风发展的压强等物理因素的 3 维可视化,并展现了台风强度随时间变更逐渐转弱的演变过程。实验结果表明,提出的算法可达到实时绘制的要求,在球体表面较为理想地实现了台风的可视化,并可实现动态绘制效果。由于 GPU 加速只使用 GPU 的 3 维纹理技术,并没有发挥 GPU 强大的并行计算能力。进一步工作将采用 CUDA 构架,设计和实现台风的并行动态快速绘制。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] McCormick B H. Visualization in scientific computing[J]. ACM SIGBIO Newsletter, 1988, 10(1): 15-21.
- [ 2 ] Zhou C D, Qin S R, Yi A J. Theory of Scientific Visualization and Intelligent Virtual Display System [ M ]. Beijing: Science Press, 2007. [周传德,秦树人,尹爱军. 科学可视化理论及智能虚拟显示系统[M]. 北京:科学出版社, 2007.]
- [ 3 ] Thompson E F, Cardone V J. Practical modeling of hurricane surface wind fields[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1996, 122(4): 195-205.
- [ 4 ] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions [ J ]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11): 1700-1709.
- [ 5 ] Vickery P J, Skerlj P F, Steckley A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations [ J ]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1203-1221.
- [ 6 ] Sharma R N, Richards P J. A re-examination of the characteristics of tropical cyclone winds [ J ]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1-3): 21-33.
- [ 7 ] Amano T, Fukushima H, Ohkuma T, et al. The observation of typhoon winds in Okinawa by doppler sodar [ J ]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1-3): 11-20.
- [ 8 ] Healey C G, Enns J T. Large datasets at a glance: combining textures and colors in scientific visualization [ J ]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(2): 145-167.
- [ 9 ] Zhu Z Y. Research on 3D modeling and scene simulation of typhoon [ D ]. Shanghai: Tongji University, 2008. [朱震毅. 台风 3 维建模与视景仿真研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.]
- [ 10 ] Wang C B, Zhu Z Y, Gao Y, et al. Physically based modeling and rendering of typhoon [ J ]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 513-517. [王长波,朱振毅,高岩,等. 基于物理的台风建模与绘制[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 513-517.]
- [ 11 ] Ge Y J, Zhao L, Xiang H F. Review for numerical typhoon models based on extreme wind velocity prediction [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 31-40. [葛耀君,赵林,项海帆. 基于极值风速预测的台风数值模型评述[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 31-40.]
- [ 12 ] Levoy M. Display of surfaces from volume data [ J ]. IEEE Comput Graph Appl, 1988, 8(3): 29-37.
- [ 13 ] Chu J J, Yang X, Gao Y. Ray-casting-based volume rendering algorithm using GPU programming [ J ]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(2): 257-262. [储璟璇,杨新,高艳. 使用 GPU 编程的光线投射体绘制算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(2): 257-262.]
- [ 14 ] Jiang H Y, Li N. Improved 3D visualization using ray casting method [ J ]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2008, 13(1): 21-23. [姜慧研,李宁. 改进的 3 维可视化用光线投射算法[J]. 中国体视学与图像分析, 2008, 13(1): 21-23.]
- [ 15 ] An X J, Peng Y J, He M X. Study of accelerating ray-casting algorithm based on space leaping [ J ]. Journal of System Simulation, 2006, 18(z1): 304-307. [安新军,彭延军,何明祥. 空间跳跃的光线投射加速算法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(z1): 304-307.]
- [ 16 ] Kruger J, Westermann R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering [ C ] // Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 ( VIS' 03 ). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2003: 287-292.
- [ 17 ] Hadwiger M, Ljung P, Salama C R, et al. Advanced illumination techniques for GPU volume raycasting [ C ] // ACM SIGGRAPH Asia 2008 Courses. Singapore: ACM Press, 2008: 1-166.
- [ 18 ] Hong Q, Zhang S S, Yang M, et al. Efficient ray-casting algorithm in 3D regular data sets [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(5): 39-41. [洪歧,张树生,杨敏,等. 基于 3 维规则数据场的快速光线投射法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(5): 39-41.]