

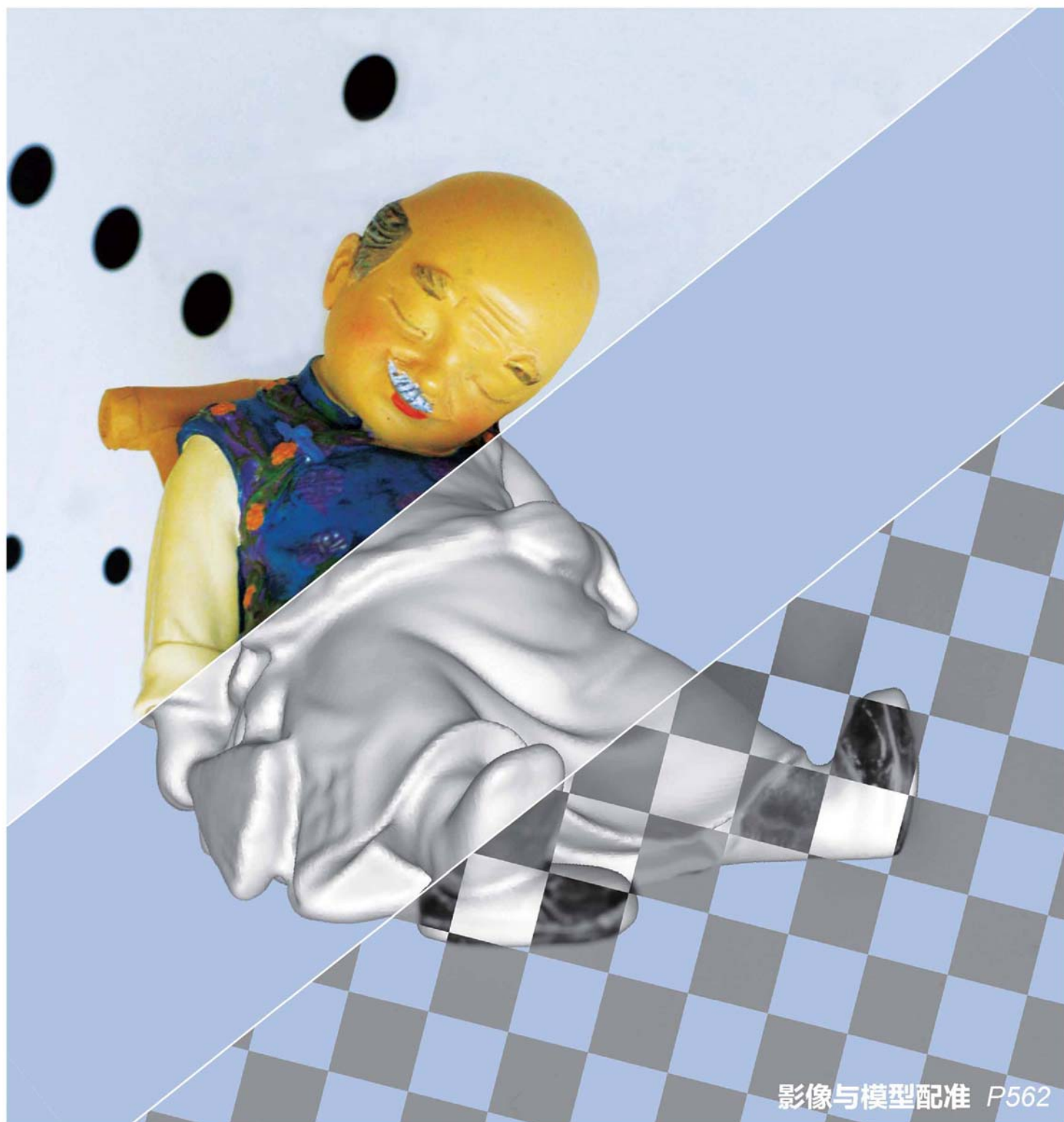


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

2014  
04  
VOL.19

ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4月16日

中国精品科技期刊  
中国国际影响力优秀学术期刊  
中国科技核心期刊

## 版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

## Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所  
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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

**Journal of Image and Graphics**

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS  
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of  
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation  
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

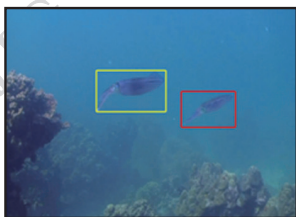
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

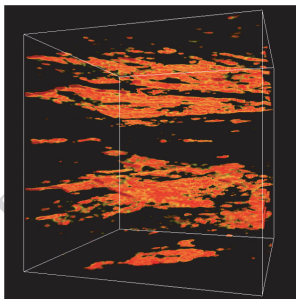
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

### 图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪  
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 ..... 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪  
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 ..... 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理  
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 ..... 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法  
刘海军, 常东超, 张凌宇 ..... 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法  
王继军 ..... 0527

### 图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪  
王慧斌, 程勇, 陈哲 ..... 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测  
徐丹, 唐振民, 徐威 ..... 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位  
李志, 谢强 ..... 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示  
李国祥, 夏国恩 ..... 0556

### 图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准  
郑顺义, 王晓南 ..... 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性  
惠国保, 李东波 ..... 0569

### 计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制  
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 ..... 0577

### 医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复  
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 ..... 0583

### 遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别  
曾接贤, 付俊, 符祥 ..... 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用  
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 ..... 0603

### 第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法  
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 ..... 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘  
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 ..... 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述  
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 ..... 0630
- $L_1$ 优化在网格去噪中的应用  
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 ..... 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现  
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 ..... 0645

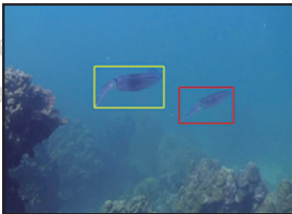
- 第五届数字地球高峰论坛征文通知 ..... 封三

# CONTENTS

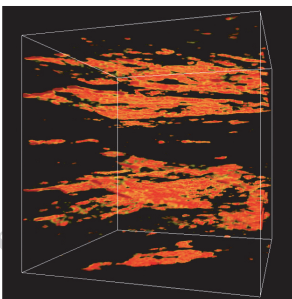
## JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

### Image Processing and Coding

|                                                                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector<br>Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui ..... | 0493 |
| Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm<br>Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng .....                  | 0502 |
| Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing<br>Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian .....                 | 0512 |
| Improved local directional pattern texture descriptor<br>Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu .....                                        | 0520 |
| High capacity reversible watermarking for image interpolation space<br>Wang Jijun .....                                                        | 0527 |

### Image Analysis and Recognition

|                                                                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Visual depth based feature calculation and underwater target tracking<br>Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe .....         | 0534 |
| Combining color names with spatial information for salient object detection<br>Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei .....        | 0541 |
| Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location<br>Li Zhi, Xie Qiang ..... | 0549 |
| The global descriptor for bending non-rigid shapes<br>Li Guoxiang, Xia Guoen .....                                       | 0556 |

### Image Understanding and Computer Vision

|                                                                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects<br>Zheng Shunyi, Wang Xiaohan ..... | 0562 |
| Robust descriptor structured by pixel clustering<br>Hui Guobao, Li Dongbo .....                                   | 0569 |

### Computer Graphics

|                                                                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks<br>Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan ..... | 0577 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|

### Medical Image Processing

|                                                                                                                                                     |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality<br>Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin ..... | 0583 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|

### Remote Sensing Image Processing

|                                                                                                                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments<br>Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang .....                 | 0592 |
| Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images<br>Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai ..... | 0603 |

### Special Issue on HHME 2013

|                                                                                                                                                  |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points<br>Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao ..... | 0613 |
| User preference mining for soccer video search engine<br>Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao .....                     | 0622 |
| Novel binary feature from intensity difference quantization<br>Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao .....                    | 0630 |
| The application of $l_1$ -optimization in mesh denoising<br>Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun .....               | 0637 |
| The design and implementation of real time MVC transcoding<br>Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang .....                                        | 0645 |

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0577-06

论文引用格式: 李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远. 针对全空子数据体的 GPU 体绘制[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 577-582. [DOI:10.11834/jig.20140412]

## 针对全空子数据体的 GPU 体绘制

李国和<sup>1,2,3</sup>, 段忠祥<sup>1,2</sup>, 吴卫江<sup>1,2,3</sup>, 洪云峰<sup>3</sup>, 刘智渊<sup>3</sup>, 程远<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)油气数据挖掘北京市重点实验室, 北京 102249;

3. 石大兆信数字身份管理与物联网技术研究院, 北京 100029

**摘要:** 目的 体绘制是 3 维数据可视化的主要方法之一。用于体绘制的数据体中包含大量的空体素, 导致光线投射算法进行没有意义的重采样计算, 必然降低绘制算法效率。针对全空子数据体体绘制低效问题, 提出基于 GPU 体高效绘制方法。**方法** 利用八叉树数据结构组织数据, 有效管理包含许多空体素的子数据体。通过绘制八叉树非全空叶子节点子数据体表面, 使光线投射算法中起始和终止重采样位置更接近数据体中的可视部分, 同时根据八叉树全空节点子数据体判定纹理查询结果, 计算合适的跳跃步长, 快速跳过八叉树中全空节点子数据体。**结果** 当数据体中空体素较多时, 确定合适的八叉树深度, 有效地跳过数据体中的空体素, 减少体绘制运算量, 实现对原基于体包围盒表面绘制的 GPU 光线投射算法的加速。**结论** 设计不透明度函数, 凸显数据体中层位面, 并将算法成功应用于地震数据可视化, 取得很好应用效果。

**关键词:** 体绘制; 八叉树; 全空子数据体; 地震数据

## GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks

Li Guohe<sup>1,2,3</sup>, Duan Zhongxiang<sup>1,2</sup>, Wu Weijiang<sup>1,2,3</sup>, Hong Yunfeng<sup>3</sup>, Liu Zhiyuan<sup>3</sup>, Chen Yuan<sup>3</sup>

1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Beijing Key Lab of Data Mining for Petroleum Data, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. PanPass Institute of Digital Identification Management and Internet of Things, Beijing 100029, China

**Abstract:** **Objective** Volume rendering is one important method for 3D data visualization. Volume data for volume rendering often includes a lot of empty voxels, resulting in decreasing the rendering efficiency for ray-casting algorithms, because meaningless resampling positions may be computed. This paper presents a GPU-based volume rendering method for full-empty sub-data blocks to efficiently improve the rendering speed. **Method** The sub-data blocks with a lot of empty space are effectively managed with an octree structure. By rendering surfaces of the non-full-empty sub-data blocks of leaf nodes in the octree, the start and end resampling positions of the ray-casting algorithm are closer to the visible part in the data volume. Meanwhile, the appropriate leaping steps are calculated to quickly skip the full-empty sub-data blocks according to the lookup result of the full-empty subdata blocks confirming texture. **Result** As a result, the meaningless resampling points are greatly reduced and the new algorithm, which is based on the selection of the depth of octree and effectively skipping full-empty subdata blocks, shows better performance than the original GPU ray-casting algorithm with bounding box surface rendering when the data volume contains a lot of empty voxel. **Conclusion** The new improved algorithm is success-

收稿日期: 2013-07-17; 修回日期: 2013-11-04

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2009AA062802); 国家自然科学基金项目(60473125); 中国石油(CNPC)石油科技中青年创新基金项目(05E7013); 国家重大专项子课题(G5800-08-ZS-WX)

**第一作者简介:** 李国和(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 2005 年于北京航空航天大学获计算机应用技术专业博士学位, 主要研究领域为人工智能、数据可视化。E-mail: lgh102200@sina.com

fully applied in seismic data visualization, with an opacity function designed to highlight the layer surfaces in the data volume, which shows favorable practical effect.

**Key words:** volume rendering; octree; full-empty subdata blocks; seismic data

## 0 引言

体绘制算法根据数据场内采样点对屏幕像素的贡献大小直接产生最终图像,无需构建中间几何图元<sup>[1-2]</sup>。基于 GPU 硬件的光线投射体绘制算法通过绘制数据体包围盒表面,获取光线与数据体的交点,确定起始和终止采样位置以及光线方向<sup>[3]</sup>。当数据体包含许多空体素,光线从数据体包围盒的表面出发,可能产生很多对最终图像无贡献的重采样点<sup>[4-5]</sup>。利用八叉树数据结构组织体数据,可有效管理空体素<sup>[5-7]</sup>。针对含有许多空体素的数据体,在八叉树构建过程中,产生 3 种节点:实子数据体节点(不包含空体素)、半空子数据体节点(一部分体素为空体素)和全空子数据体节点(包含所有体素为空体素)。采用八叉树组织数据,提出基于 GPU 与带有全空子数据体纹理判定相结合的体绘制方法,提高重采样和图像合成的运算速度,实现实时显示,并应用于地震数据的可视化,提高地震数据解释的准确性、可靠性和效率<sup>[8]</sup>。

## 1 GPU 光线投射算法原理

设数据体采样点集  $U$ , 对于  $\forall u \in U$ , 根据数据分类设置其颜色  $c(u)$  和不透明度  $\alpha(u)$ 。从屏幕每个像素沿视线发出光线  $r(eye, pix)$ , 其中  $eye$  和  $pix$  为视点和屏幕像素坐标位置。在光线  $r$  上选择若干重采样点  $\{p\}$ , 并根据每个重采样点  $p$  所在体素 8 个采样点  $\{u_i | i=1, \dots, 8\}$  的颜色  $\{c(u_i) | i=1, \dots, 8\}$  和不透明度  $\{\alpha(u_i) | i=1, \dots, 8\}$  计算其颜色和不透明度  $c(p), \alpha(p)$ 。沿着光线对一系列  $\{c(p), \alpha(p)\}$  进行颜色合成, 得到光线投射算法可视化图像<sup>[1]</sup>。

在 GPU 上实现光线投射算法时, 利用绘制体包围盒获得光线进入和穿出数据体的位置<sup>[3]</sup>。设体包围盒 8 个顶点的空间位置坐标为  $(x_i, y_i, z_i) (x_i, y_i, z_i \text{ 变化范围为 } [0.0, 1.0], i \in [1, 8])$ 。在绘制包围盒过程中, 设置其顶点的颜色和纹理坐标也为  $(x_i, y_i, z_i)$ 。通过剔除前向面和后向面, 绘制包围盒后可从颜色缓冲区和纹理坐标中获得光线进入和离开体包围盒的

位置(多步体包围盒绘制 GPU 体绘制方法<sup>[3]</sup>)。

设任一光线  $r$  进入和离开体包围盒的位置分别为  $p_{in}$  和  $p_{out}$ , 则光线上第  $i$  个重采样点  $p_i$  位置为

$$p_i = p_{in} + idn(p_{out} - p_{in}), i \in \mathbf{N} \quad (1)$$

式中,  $d$  为采样步长,  $n(p_{out} - p_{in})$  为对光线方向的归一化。

如果采用从前向后的颜色合成方法, 累积不透明度不断增加。当累积不透明度超过 1.0 时, 提前终止光线合成。设颜色缓冲区中的颜色和不透明度为  $C_{dst}$  和  $\alpha_{dst}$ , 当前需要合成的重采样点的颜色和不透明度为  $C_{src}$  和  $\alpha_{src}$ , 则光线投射算法从前向后的颜色和不透明度合成公式为<sup>[3]</sup>

$$C_{dst} = C_{dst} + (1 - \alpha_{dst}) \alpha_{src} C_{src} \quad (2)$$

$$\alpha_{dst} = \alpha_{dst} + (1 - \alpha_{dst}) \alpha_{src}$$

对于绘制窗口中每个像素点对应一个合成颜色, 从而形成体绘制的可视化图像。

## 2 数据体的八叉树构建

数据体中采样点已设置颜色和不透明度。设  $N_{i,j}$  为八叉树中第  $i$  层第  $j$  个节点, 则有  $g: N_{i,j} \rightarrow V_{i,j} (j \in [1, 8])$ , 其中  $V_{i,j}$  为节点  $N_{i,j}$  指向的子数据体, 且根节点指向的数据体空间  $V_{1,1}$  包含数据体内所有采样点。随着八叉树深度的不断增加, 每个子数据体  $V_{i,j}$  被进一步划分成 8 个等同大小的子数据体  $V_{i+1,j} (j \in [1, 8])$ , 直到满足终止划分条件, 或者达到最大深度。

设数据体的大小为  $xLen \times yLen \times zLen$ , 并存储在数据单元  $volumeData[xLen][yLen][zLen]$  中。数据结构  $struct dataIndex$

```
{ int xMinMax[2]; int yMinMax[2];
  int zMinMax[2]; }
```

存储八叉树节点包含的采样点在数据单元  $volumeData$  中  $X, Y, Z$  3 个方向的最大最小索引, 用于确定每个八叉树节点包含的采样点。

八叉树节点的数据结构为

```
struct octreeNode
{
  vertex centerOfBlock; //节点中心坐标
  float halfWidth; //节点数据体空间长度的一半
```

```

bool nodeIsDraw;    //节点是否绘制
struct octreeNode * children[8]; //孩子节点指针
dataIndex sampleOfNode;
//节点包含采样点在数据单元中索引

```

用于组织数据体的八叉树构建是一个递归过程。如果当前节点为实子数据体节点或者全空子数据体节点时,则终止八叉树节点的划分;如果当前节点为非全空子数据体节点,且未达到八叉树最大深度,则继续划分当前节点。划分过程中,如果某个采样点落在相邻两个子数据体边界,则该采样点同时属于两个子数据体(注:防止可视化显示出现断裂现象)。设  $M$  为八叉树最多划分次数,数据体每一次八叉树划分具体过程如下:

```

Function octreeCreate(center, halfWidth, M, samIndex)
begin
    //创建一个八叉树节点指针并初始化
    OctreeNode * ocNode ← new octreeNode(
        center, halfWidth, false, null, samIndex);
    //判断当前节点是实节点,半空节点还是全空节点
    judgeTypeOfNode();
    //达到最大层数或者为实节点或全空节点
    if (M ≤ 0 || Node is full or empty)
        //设置节点是否绘制,如果为全空节点
        //ocNode->nodeIsDraw 设置为 false, 否则为 true
        setIfNodeDraw(ocNode);
        //结束划分,返回当前节点
        return ocNode;
    //为半空节点且未达到最大层数,继续划分
    else
        for i ← 1 to 8
            //计算第 i 个孩子节点空间中心
            newCenter ← getChildCenter();
            //计算第 i 个孩子节点包含采样点
            //索引
            newSamIndex ← getChildSamIndex();
            ocNode->children[i]
                ← octreeCreate(newCenter, halfWidth/2.0, M-1,
                    newSamIndex);
        return ocNode;
    end

```

### 3 基于 GPU 和全空子数据体判定的体绘制算法

为了使光线起始和终止采样位置更接近数据体

可视部分,在渲染过程中,首先绘制八叉树非全空叶子节点子数据体表面,并进行深度测试。如果绘制的是最接近视点的子数据体表面,则得到光线的新起始采样位置;如果绘制的是最远离视点的子数据体表面,则得到光线的新终止采样位置(如图1所示)。

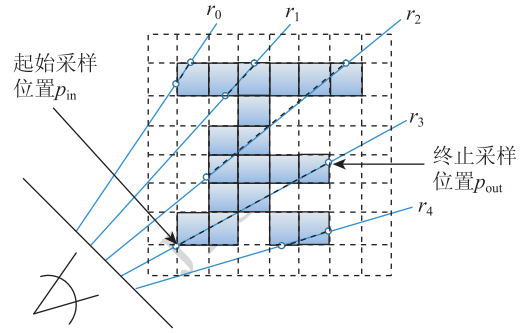


图1 非全空叶子节点子数据体空间表面绘制

Fig.1 Rendering the non-full-empty subdata block surfaces of leaf Nodes

对于选取的重采样点可能落在全空子数据体的部分光线(如图1中  $r_2$  和  $r_3$ ),创建全空节点子数据体判定纹理 emptyTex,其3个方向维数均为  $2^M + 1$  (如图2)。首先,对于任意  $\forall s, t, q \in [0.0, 1.0]$ ,设置纹理值  $\text{emptyTex}(s, t, q) = (1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$ ,其中  $s, t, q$  为纹理坐标,  $(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$  为 emptyTex 对应纹理坐标位置 R、G、B、A 分量值。设  $(v_x, v_y, v_z)$  为子数据体  $V(v_x, v_y, v_z, l)$  中心坐标,  $l$  为其边长。若  $V(v_x, v_y, v_z, l)$  为全空子数据体,对  $\forall s \in [v_x - l/2.0, v_x + l/2.0]$ ,  $t \in [v_y - l/2.0, v_y + l/2.0]$ ,  $q \in [v_z - l/2.0, v_z + l/2.0]$ ,设置  $\text{emptyTex}(s, t, q) = (l, l, l, 0.0)$ 。因此八叉树中所有全空节点子数据体区域所对应 emptyTex 中纹理值 A 分量必为 0.0。当非全空节点或实节点与全空节点区域相邻时,经

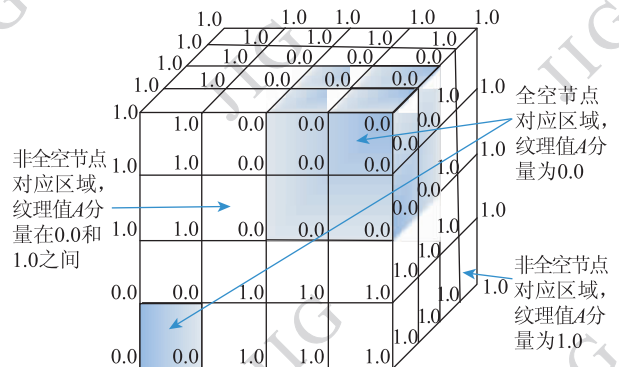


图2 全空子数据体查询纹理设置

Fig.2 The set of full-empty subdata blocks confirming texture

过纹理内部线性插值,其纹理值  $A$  分量在 0.0 和 1.0 之间,其他区域纹理值  $A$  分量为 1.0。

假设重采样点  $p$  所在光线起始和终止重采样位置为  $p_{in}$  和  $p_{out}$ ,则  $L = |p_{out} - p_{in}|$  为光线采样长度。若  $p$  落在子数据体  $V(v_x, v_y, v_z, l)$  中,其对应八叉树节点深度为  $m$ ,则显然有  $l = 1.0/2^{m-1}$  (划分  $m-1$  次)。根据  $p$  点坐标,查询全空子数据体的判定纹理值  $emptyTex(x_p, y_p, z_p) = (R_p, G_p, B_p, A_p)$  (即包围盒绘制使得采样点的纹理坐标和空间坐标一致)。若  $A_p = 0.0$ ,则  $V(v_x, v_y, v_z, l)$  为全空子数据体,有  $R_p = G_p = B_p = l$ ,设置跳跃步长为

$$d_{Leap} = \begin{cases} \frac{L}{2^{m-1}} = Ll & Ll > 2d \\ 2d & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

这样,跳跃步长或者设置为光线在全空子数据体中的估量长度,或者采用 2 倍正常步长快速跳过全空子数据体,其在重采样过程中动态变化。正常步长  $d$  根据可视化的效果由用户设定,一般远小于跳跃步长  $d_{Leap}$ ,其设置越大,重采样点数量越少,光线后面的重采样点对图像贡献越多,算法计算量减少。若正常步长选择过大,重采样点数量太少从而导致体数据对可视化图像的贡献太小,图像真实感会严重下降。

通过查询全空子数据体判定纹理  $emptyTex$  对应位置纹理值  $A$  分量是否为 0.0,判断当前重采样点是否在全空子数据体内。对于落在全空子数据体区域的重采样点,设置跳跃步长  $d_{Leap}$  计算下一重采样点。改进后的 GPU 光线投射算法如图 3 所示,具体步骤如下:

1) 根据采样点颜色和不透明值,建立体纹理,构建八叉树和全空节点子数据体判定纹理  $emptyTex$ 。

2) 启用深度测试,绘制最远离视点的八叉树非全空叶子节点子数据体表面,获取光线的终止采样位置  $p_{out}$ 。

3) 再次构建八叉树,启用深度测试,绘制最接近视点的八叉树非全空叶子节点子数据体表面,启用顶点着色和片段着色功能,由纹理坐标获取光线的起始采样位置  $p_{in}$ 。

4) 进行重采样和图像合成运算。如果累积不透明度超过 1.0 或者重采样点位于数据体外,则结束运算,返回合成颜色;否则进行颜色合成。如果当前重采样点的不透明度为 0.0,则查询全空节点子

数据体判定纹理  $emptyTex$ 。如果对应纹理值  $A$  分量为 0.0,则采用跳跃步长  $d_{Leap}$  计算下一重采样点,否则采用正常步长  $d$  计算新的重采样点。

5) 根据屏幕上每个像素的合成颜色,将可视化图像渲染到屏幕。

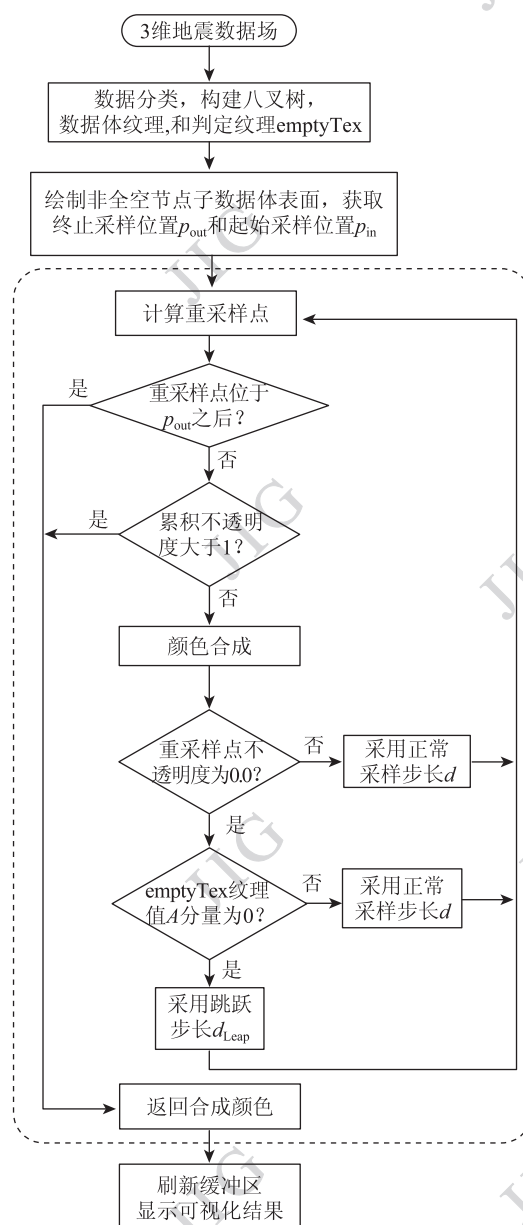


图3 改进的 GPU 光线投射算法可视化流程

Fig. 3 The rendering pipeline of improved ray-casting algorithm on GPU

## 4 面向地震数据体绘制可视化

### 4.1 不透明度函数和实验数据

油气地震勘探采集的数据体经过可视化设置,

形成由颜色和不透明度表示用于可视化的数据体。这里采用的不透明度设置函数为<sup>[9-10]</sup>

$$\alpha(p) = \alpha_v \begin{cases} 1 & f(p) = f_v \\ 1 - \frac{k(p) |f(p) - f_v|}{t} & |f(p) - f_v| \leq t \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $f_v$  为层位数据值,  $\alpha_v$  为其相应不透明度,  $k(p)$  为与采样点  $p$  数据值相关的坡度函数,  $t$  为显示层位面厚度。根据观测目的, 通过设置多个不同的  $f_v$ ,  $k(p)$  函数和  $t$  值, 显示不同特性的层位面。如果  $t$  选择过大, 将难于凸显出数据场中层位面; 反之,  $t$  太小, 则出现虚假的断裂和空洞。通过交互调节  $t$  值, 得到合适的层位显示。

地震数据采样密度大<sup>[2]</sup>, 数据量大, 细节要求不高<sup>[11-12]</sup>, 通过不透明度设置, 数据体可能产生包含大量空体素。地震数据体选定  $101 \times 101 \times 400$  的

新疆某油田地震数据。

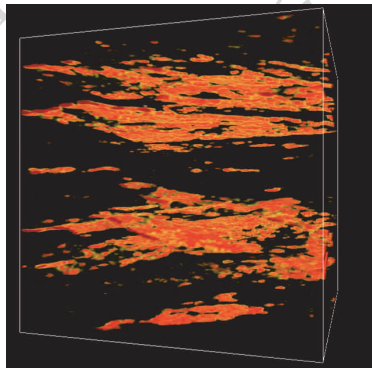
## 4.2 实验平台

实验平台为英特尔 Core i3 350 M 处理器, 6 G 内存, 显卡型号为 NVIDIA GeForce GT 330 M 1G 显存的微机。

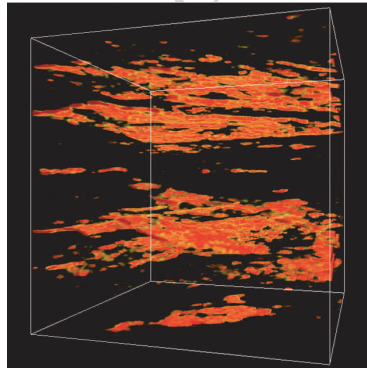
## 4.3 实验结果

不透明度函数参数设置如下:  $k(p) = 1.0$  (常值函数),  $t = 20.0$ ,  $\alpha_v = 1.0$ ,  $f_v$  选择地震数据的最大值 (数据变化范围为  $[-114.0, 114.0]$ ), 选定正常步长为  $1.0/400.0$ , 跳跃步长根据全空体素不同分布情况, 通过式(3)计算获得。

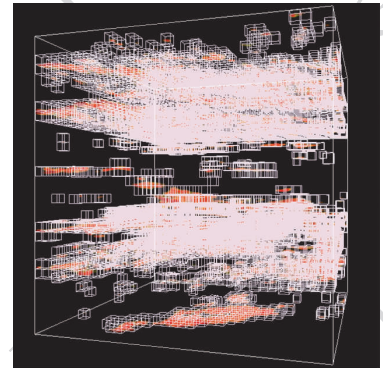
地震数据体绘制可视化效果如图4所示。原光线投射算法为传统的多步体包围盒绘制 GPU 光线投射算法实现的地震数据可视化<sup>[3]</sup>。本文算法为采用八叉树组织数据与全空子数据体纹理判定相结合的 GPU 光线投射算法。从图4中可以看出, 两种体绘制算法实现的数据可视化效果基本一致。



(a) 原光线算法可视化



(b) 本文算法可视化



(c) 八叉树非全空子数据体

图4 GPU 地震数据体绘制可视化结果

Fig. 4 The seismic visualization image of volume rendering based on GPU

## 4.4 实验性能与分析

### 4.4.1 空体素率固定八叉树深度变化

不透明度函数设置与上述相同, 使得地震数据体中空体素率固定, 记录不同八叉树深度时地震数据可视化的平均绘制帧速 (如图5(a)所示)。从图5中可以看出, 原光线投射算法绘制速度稳定。随着八叉树深度的增加, 本文算法在八叉树深度为7时 (划分6次), 加速效果最明显。如果八叉树深度过高, 可以跳过更多的空体素, 削减重采样和图像合成的运算量, 但在获取光线的起始和终止采样位置时, 需要绘制更多的子数据体表面, 从而使渲染的时间增加。如果八叉树深度过低, 产生的全空子数据体太少, 将无法有效地跳过空体素实现加速, 反而

因渲染非全空子数据体表面, 查询全空子数据体纹理 emptyTex 等操作的开销, 降低了执行效率。两方面因素在八叉树深度为7时达到平衡, 有最快的成像速度。

### 4.4.2 空体素率变化八叉树深度固定

改变地震数据体绘制的不透明度函数参数设置, 使得显示层位面厚度  $t$  从 35.0 等量变化到 10.0, 产生不断上升的空体素率。设置八叉树深度为7, 测试不同空体素率时本文算法的绘制帧速 (如图5(b)所示)。由图5(b)可见, 原光线投射算法帧速稳定, 与数据体中空体素率基本无关。随着空体素的比率增大, 本文算法绘制速度越快。这主要是由于本文算法能够很好地跳过数据体中的空体素,

减少体绘制运算量,提高了可视化加速效果。

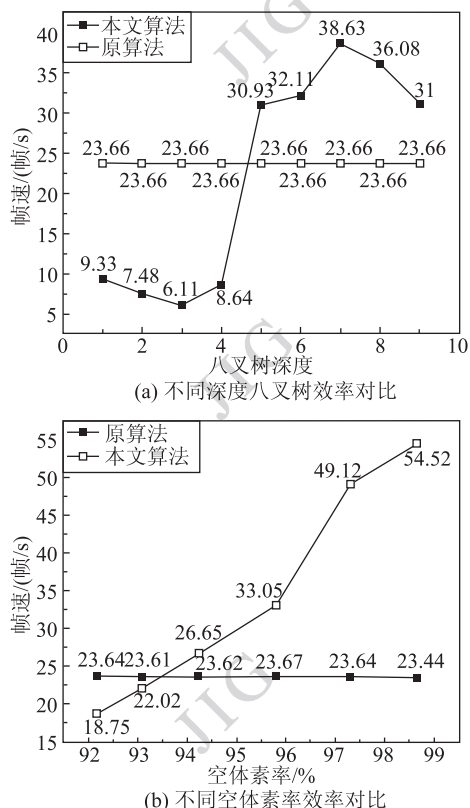


图5 地震数据 GPU 体绘制可视化效率对比  
Fig. 5 The efficiency contrast of volume visualization on GPU for seismic data

## 5 结 论

为了实现基于 GPU 的体绘制方法加速,针对含有较多空体素的数据体,利用八叉树数据结构组织数据,通过绘制八叉树非全空节点子数据体表面,获取新光线起始和终止采样位置,减少对屏幕像素没有贡献的重采样点数量。通过查询全空节点子数据体判定纹理,当重采样点位于全空子数据体内时,自动计算跳跃步长,跳过空体素,从而减少重采样点的计算,提高体绘制速度,同时确保体绘制质量。通过不透明度函数的转换,成功应用于地震数据可视化。由于显存大小的限制,目前基于硬件的体绘制算法对海量数据的可视化显示仍然有一定的困难,如何更好地组织数据体中的有效数据,优化存储策略,减少显存占用,将是下一步的研究重点。

## 参考文献 (References)

- [1] Marc L. Display of surfaces from volume data[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(3): 29-37.
- [2] Zhang E H, Gao L, Ma E A, et al. Principles and implementation of visualization on 3D seismic data volume[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2007, 16(3): 20-28. [张二华, 高林, 马仁安, 等. 三维地震数据可视化原理及方法[J]. CT 理论与应用研究, 2007, 16(3): 20-28.]
- [3] Krüger J, Westermann R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering[C]// Proceedings of the 14th IEEE Visualization. Seattle, Washington: IEEE, 2003: 287-292.
- [4] Markus H, Patric L, Christof Rezk S, et al. Advanced Illumination Techniques for GPU-Based Volume Raycasting[M]. New York, USA: ACM, 2009: 12-33.
- [5] Zou H, Gao X B, Liu X R. A ray casting algorithm based on hierarchical bounding volumes and GPU[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(2): 172-178. [邹华, 高新波, 吕新荣. 层次包围盒与 GPU 实现相结合的光线投射算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(2): 172-178.]
- [6] Wei H, Feng Q, Arie K. GPU-based object-order ray-casting for large datasets [C]// Proceedings of Volume Graphics. New York: IEEE, 2005: 177-240.
- [7] Song T, Ou Z Y, Wang Y, et al. Fast volume rendering algorithm of octree encoded volume[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(9): 1990-1996. [宋涛, 欧宗瑛, 王瑜, 等. 八叉树编码体数据的快速体绘制算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1990-1996.]
- [8] Kidd G D. Fundamentals of 3-D seismic volume visualization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(6): 702-709.
- [9] Ericson C. Real-Time Collision Detection [M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2005.
- [10] Duan Z X, Li G H. Volume Rendering Method for Spatial Seismic Data Based on GPU[C]// The 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation. Taiyuan: Atlantis Press, 2013: 0386-0390.
- [11] Hong Y, Li L M, Luo S X. 3D visualization of seismic data based on volume rendering[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(1): 23-25. [洪源, 李录明, 罗省贤. 基于体绘制技术的三维地震数据可视化[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(1): 23-25.]
- [12] Tang Z S, et al. Visualization of 3D Spatial Data Sets[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. [唐泽圣, 等. 三维数据场可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.]