基于区域结构的多尺度体数据表达及其应用

A Region-Based Multiscale Volume Representation and Its Applications

清华大学高等研究院 王律迪 指导教师: 郭百宁 教授

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

图形学中的三维物体表示

表面模型 Surface Models

- 形状：曲面几何
- 材质：纹理映射

体模型 Volume Models

- 形状：实体几何
- 材质：体纹理

表面模型的局限

- 非均匀、半透明材质
- 物体表面动态变化 (切割、破碎、风化...)
- 物体内部属性动态变化 (毛发、流体...)

体模型

- 理论上：更通用的表示
  - 描述物体在空间中占据的范围
  - 描述物体中任意一点的材质属性
- 实际中：应用不及表面模型广泛

传统体模型的问题与挑战

1. 表达能力有限
2. 建模困难
3. 存储开销大
4. 绘制效率低

我们的研究目标

- 一种理想的体模型表达：
  - 能表达不同类型的体数据 (expressiveness)
  - 易于创建和编辑 (ease of editing)
  - 紧凑的存储空间占用 (compactness)
  - 高效的绘制 (efficient rendering)

主要贡献

- 提出一种多尺度、分辨率无关的体数据表达
- 基于该表达的完整体建模流程
- 基于GPU的实时绘制与反走样算法
- 将区域结构思想应用于头发几何分析及建模

相关工作

[模型表达]	[建模方法]
• 离散采样	– 实物采集 / 纹理合成
• 噪声函数	– 过程式建模
• 结构化表示	– 基于结构信息的建模

离散采样体模型

- 模型表达：规则三维网格上的采样点 (体素)
  - 分辨率相关，存储开销高
- 建模方式：实物采集或体纹理合成
  - 难以手工创建复杂内部构造

[Kopf et al. 2007]

[Dong et al. 2008]

[Chen & Wang 2010]

[Zhang et al. 2011]

过程噪声体模型

- 模型表达：噪声函数
  - 存储紧凑、分辨率无关，但表达能力有限
- 建模方式：选合适噪声函数并调节参数
  - 不直观，难以控制结果

[Perlin 2002]

[Goldberg et al. 2008]

[Lagae et al. 2009]

结构化体模型：Cutler et al. 2002

- 模型表达：层结构 (layered structure)
  - 表达能力有限，需转化为四面体网格
- 建模方式：脚本语言，过程式模拟

结构化体模型：Takayama et al. 2010

- 模型表达：Diffusion Surfaces
  - 无法表达多尺度特征及丰富细节
- 建模方式：交互式，利用对称性

相关工作总结

	离散采样	过程噪声	Cutler	Takayama	我们的方法
表达能力	分辨率相关	类型有限	限层结构	限平滑变化	强
易于建模	方式有限	不易控制	比较容易	是	是
存储空间	开销大	非常低	需存储四面体网格	低	低
绘制效率	非常高	较高	需预计算	需预计算	高

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

真实物体的区域结构

- 多尺度：　　不同尺度特征共存
- 分辨率无关：不同材质之间明确分界
- 形状复杂：　　非流形结构 (如T-junctions)

基于区域结构的体数据表达

- 多尺度区域划分
- 分辨率无关区域边界
- 独立的区域内部定义

区域划分的定义：SDF Tree

符号距离函数 (SDF)
Signed Distance Function

区域划分的定义：SDF Tree

区域划分的定义：SDF Tree

与其它方法比较

Octree

- 规则立方格划分
- 仅适用稀疏数据

BSP / kd-tree

- 平面分割
- 用于空间索引

SDF Tree

- 任意区域形状
- 多尺度分辨率无关

与其它方法比较

CSG Tree:

时间复杂度:

$$O(kn) \sim O(kn^2)$$

SDF Tree:

时间复杂度:

$$O(\log n)$$

k: 区域个数　n: 距离函数个数

区域内部定义

- 每个区域独立定义材质属性
- 不同具体实现可以共存
  - 离散采样体纹理
  - 过程噪声
  - 径向基函数

嵌套与实例化

- 体对象内部递归包含不同尺度的子对象
  - 不同体对象可能包含相同子对象
  - 同一体对象可能包含大量相似子对象

嵌套与实例化

- 允许体对象相互嵌套
- 体对象可有多个实例

优点：

- 减轻建模负担
- 降低存储开销
- Level-of-details

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

区域结构体模型的建模

- 支持灵活的建模方式
  - 手工建模
  - 过程式建模
  - 转换自其它模型表达

手工建模

	离散采样体模型	区域结构体模型
建模中需考虑	物体内每一点材质属性如何？	物体包含哪些尺度的子对象？每个对象由哪些区域构成？
整体结构把握	困难，无法完整看到整体结构。	通过SDF tree把握逻辑结构。
内容重用	困难，受全局分辨率限制。	通过体对象嵌套与实例化。
建模过程	线性过程。对局部的编辑容易影响周围部分。	迭代式过程。对单个区域的编辑不会影响其它区域。

生成符号距离函数

- 由多边形网格转化
- 交互式画刷工具
- 基于样本的纹理合成

生成符号距离函数

- 由多边形网格转化
- 交互式画刷工具
- 基于样本的纹理合成

生成符号距离函数

- 由多边形网格转化
- 交互式画刷工具
- **基于样本的纹理合成**

区域划分

- 交互式建模界面
- 体对象标记语言 (VOML)

Load Mesh
Load VOXL
Save VOXL
Panel
Authoring
Rendering
Animation
Misc
SDF tree view
SDF resources:
Show tree view
OBJECT
REGION
Active n/a
Color
Load region
Embed object
New
Load
Translation
Rotation
Scaling
SDF
Import from file...
(empty)
Instance

体对象标记语言 (Volumetric Object Markup Language)

```
<OBJECT name="skin">
  <SDF name="D1" file="…">
    <POSITIVE>
      <SDF name="D2" file="…">
        <POSITIVE>
          <SDF name="D3" file="…">
            <POSITIVE region="empty"/>
            <NEGATIVE region="epiderm"/>
          </SDF>
        </POSITIVE>
        <NEGATIVE>
          <SDF name="D4" file="…">
            <POSITIVE region="dermis"/>
            <NEGATIVE region="hypoderm"/>
          </SDF>
        </NEGATIVE>
      </SDF>
    </POSITIVE>
    <NEGATIVE region="hair"/>
  </SDF>
</OBJECT>
```

体对象标记语言 (Volumetric Object Markup Language)

```
<OBJECT name="skin">
  <SDF name="D1" file="…">
    <POSITIVE>
      <SDF name="D2" file="…">
        <POSITIVE>
          <SDF name="D3" file="…">
            <POSITIVE region="empty"/>
            <NEGATIVE region="epiderm"/>
          </SDF>
        </POSITIVE>
        <NEGATIVE>
          <SDF name="D4" file="…">
            <POSITIVE region="dermis"/>
            <NEGATIVE region="hypoderm"/>
          </SDF>
        </NEGATIVE>
      </SDF>
    </POSITIVE>
    <NEGATIVE region="hair"/>
  </SDF>
</OBJECT>
```

区域内部定义

- 通过交互式建模界面
- 通过VOML
- 由离散采样数据转换 (径向基函数拟合)

径向基函数拟合

离散采样体数据 C

m个径向基函数

$$\min \sum_{x} \left\| C(x) - \sum_{q=1}^{m} w_q B_q(x) \right\|^2$$

径向基函数拟合

- 算法思路
  - 分区域拟合，避免color bleeding
  - 使用L-BFGS-B minimizer [Zhu et al. 1997]
  - 利用teleportation避免局部最优 [Zhou et al. 2008]

拟合结果

原始输入 32 x 32 x 32
(tricubic interpolated)

131 KB

400 RBFs
(without teleportation)

4 KB

1000 RBFs
(with teleportation)

11 KB

建模结果

Bitmap solid texture

Resolution: 128^3

Memory: 6.0 MB

Vector solid texture

Num. RBFs: 5183

Memory: 1.2 MB

Bitmap solid texture
Resolution: 128^3
Memory: 6.0 MB
Vector solid texture
Num. RBFs: 5183
Memory: 1.2 MB

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

紧凑存储

- 符号距离函数
  - 对距离值量化
  - 复合距离函数
- 实例化

由离散采样转换的模型

节省74% ~ 83%空间

手工创建的模型

0.7 MB ~ 6.8 MB

高质量反走样

- 利用符号距离函数特性
- 避免多重采样的性能开销

未使用反走样

使用反走样

实时绘制

- 绘制速度：60~500 fps*
- 不需要预计算

NVidia GeForce GTX460
800 x 800 window size

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

头发建模的意义

- 头发(毛发)是人和动物一种重要的外观特征
- 准确的头发建模往往能极大提高计算机生成人物的真实感

(2008) The Chronicles of Narnia: Prince Caspian

(2007) Shrek the Third

(2007) Beowulf

传统头发建模方法

	手工创建	基于物理	基于图像
优点	• 灵活自由控制方便 • 适用于多种发型	• 操作简单 • 效率高	• 效果真实
缺点	• 需花费大量时间 • 要求专业技能	• 支持发型种类有限 • 难以直接控制结果	• 局限于现有发型 • 结果难以重用

缺少对现有发型几何特征的分析方法！

头发的几何特征

- 体特征：~10^5根发丝在空间中相互作用
- 区域结构：相邻发丝具有类似几何形状

我们的方法

- 分析
  - 由无结构的输入模型构建多尺度区域结构
- 合成
  - 利用结构信息，进行基于样本的建模

分析(Analysis)：多尺度区域划分

- 算法思想：
  - 定义发丝之间几何差异的度量 (能量函数)
  - 基于变分(variational)的聚类 [Cohen-Steiner et al. 2004]

Level 0 (输入) Level 1 Level 2

局部特征 全局特征

自动聚类

- 能量函数随迭代次数变化趋势

合成(Synthesis)：基于样本的建模

合成(Synthesis)：混合不同发型特征

输入发型 1　　输入发型 2　　**输出发型**

Source Hairstyle
(providing cluster details)

交互式头发编辑

- 传统的梳子工具 (3ds Max, Blender, …)
  - 改变头发局部特征
- 利用发簇区域结构的梳子工具
  - 保持发簇特征
  - 使采集到的头发数据便于手工编辑

User-controlled Synthesis:

Interactive Combing

研究背景

- 选题背景
- 研究目标
- 相关工作

论文工作

- 模型表达
- 建模
- 存储及绘制
- 头发分析与建模的应用

总结

- 主要贡献
- 评审意见汇总
- 已发论文

总结

- 提出一种多尺度、分辨率无关的体数据表达
- 基于该表达的完整体建模流程
- 基于GPU的实时绘制与反走样算法
- 将区域结构思想应用于头发几何分析及建模

评审意见及修改方案

- 应给出能够表达的物体范围的更明确定义
- 应提供更多表现物体内部细节的实例
- 应给出描述交互式建模过程的实例

已发论文

- Vector Solid Textures
  Lvdi Wang, Kun Zhou, Yizhou Yu, Baining Guo. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2010)*, *29*, 4, 86:1-8 **(SCI IF: 3.383)**
- Example-Based Hair Geometry Synthesis
  Lvdi Wang, Yizhou Yu, Kun Zhou, Baining Guo. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2009)*, *28*, 3, 56:1-9 **(SCI IF: 3.383)**
- High Dynamic Range Image Hallucination
  Lvdi Wang, Li-Yi Wei, Kun Zhou, Baining Guo, Heung-Yeung Shum. *EUROGRAPHICS Symposium on Rendering 2007*, 321-326 **(SCI IF: 1.860)**
- Rendering from Compressed HDR Textures on GPU
  Lvdi Wang, X. Wang, P.-P. Sloan, L.-Y. Wei, X. Tong, Baining Guo. *SIGGRAPH Symposium on Interactive Graphics and Games 2007*, 17-24

致谢

- 感谢导师郭百宁老师的指导
- 感谢一起合作的老师和同学
- 感谢评审老师的评阅和意见
- 感谢答辩委员会的各位老师