织物渲染

罗幸荣

研究背景

研究背景

以衣服为主体的各式各样的织物，是虚拟世界中不可或缺的一部分。然而由于织物种类的多样性和织物结构的复杂性，如何渲染出和现实世界真实感相当的织物图片，一直是计算机图形学中的一个研究热点。

研究背景

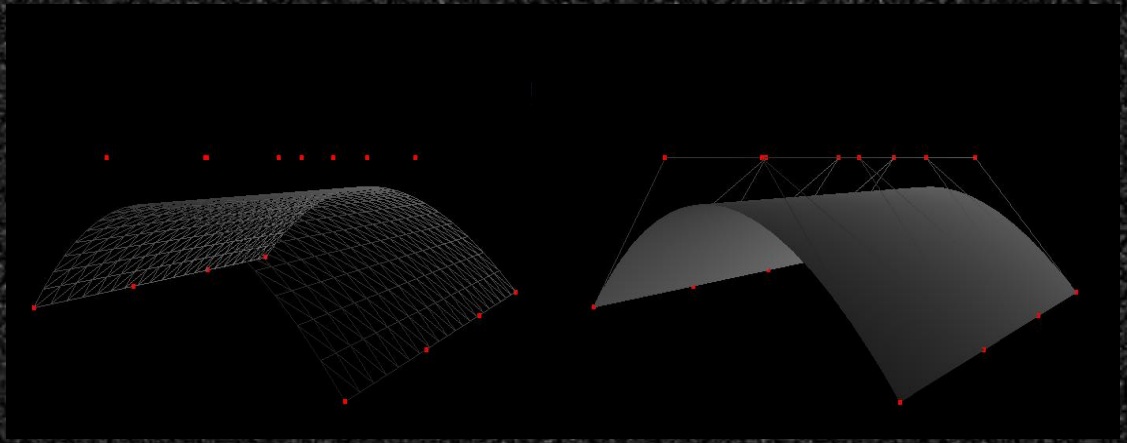
织物的几何形态

曲面、体素、纤维

织物的光散射模型

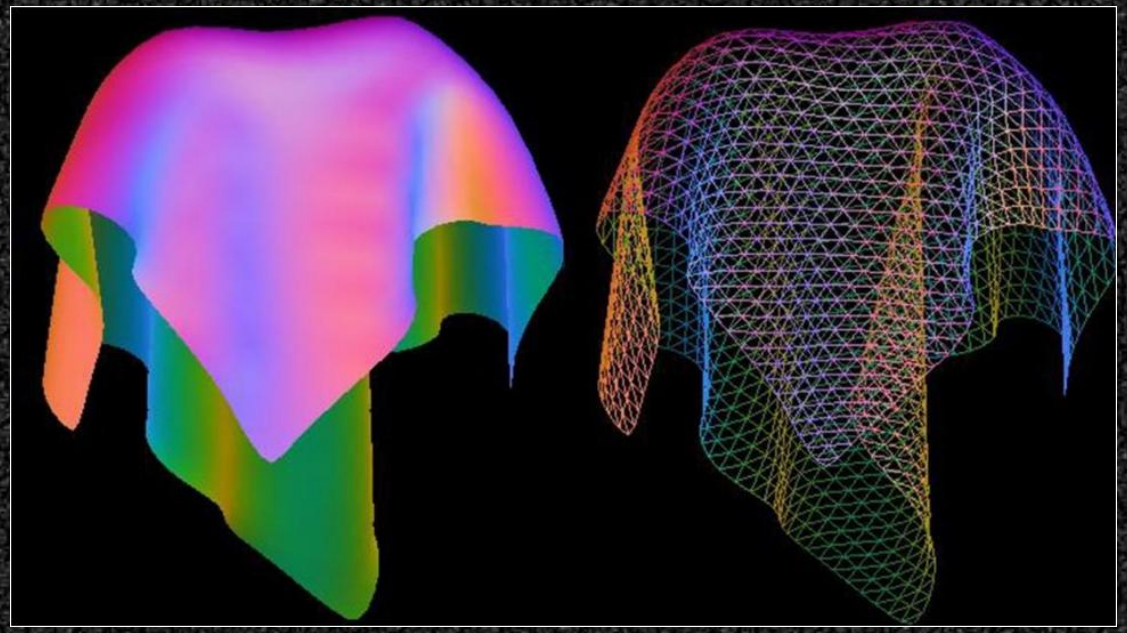
BSDFs、RTE、BCSDF

使用曲面表示织物



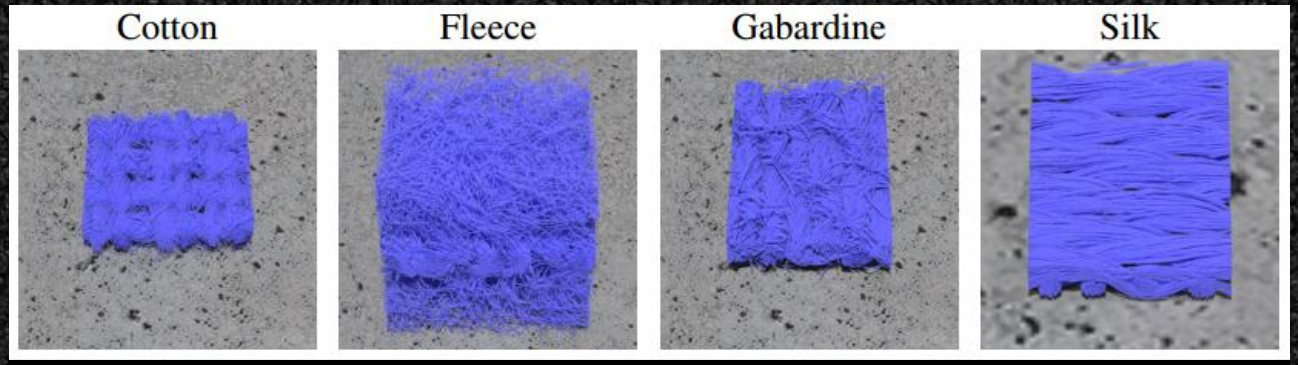
使用曲面表示织物

这类方法一般把织物表示成一张或多张网格化或参数化的二维曲面，使用纹理同时配合双向纹理函数(BTFs)或曲面上的双向散射分布函数(BSDFs)来对纺织物进行仿真。优点是集合表示简单，渲染效率高，常用于实时渲染；缺点是将织物表示为平面丢失了大量的细节，近距离观察时缺乏真实感。



曲面表示织物是计算机图形学中对织物的传统表示方法。

使用体素表示织物



由CT图片重建的纱线体素模型

使用体素表示织物

这种技术早在1989年的时候被运用于毛发的渲染，2011年的时候Xu等人才将其迁移到针织品上。为了更好的仿真现实世界的纱线，赵爽等人在2011年通过对真实衣物进行扫描得到的micro CT图片来对织物的体素模型进行重建，结合RTEs光散射模型前所未有地再现了衣物的细节丰富的不规则表面。

- 体素是在三维空间中与二维数字图像像素对应的基本单位，通常用一个小立方体来进行表示。

使用纤维表示织物

- 将织物表示成大量纤维组成的集合的方法最接近织物的自然微观结构，渲染的真实感极强。

前沿工作

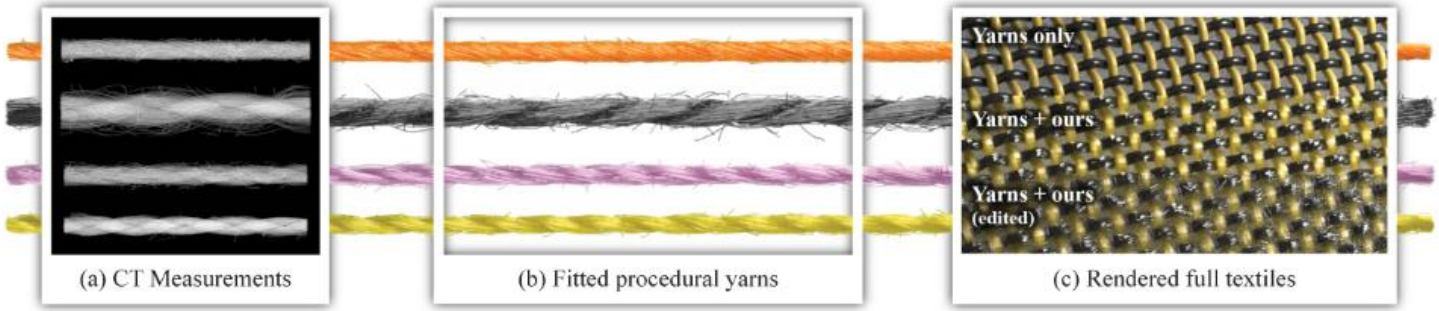
Cornell University：重点

Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering

Shuang Zhao[1], Fujun Luan[2], and Kavita Bala[2]
[1]U C Irvine, [2]Cornell University

ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2016), 35(4), July 2016

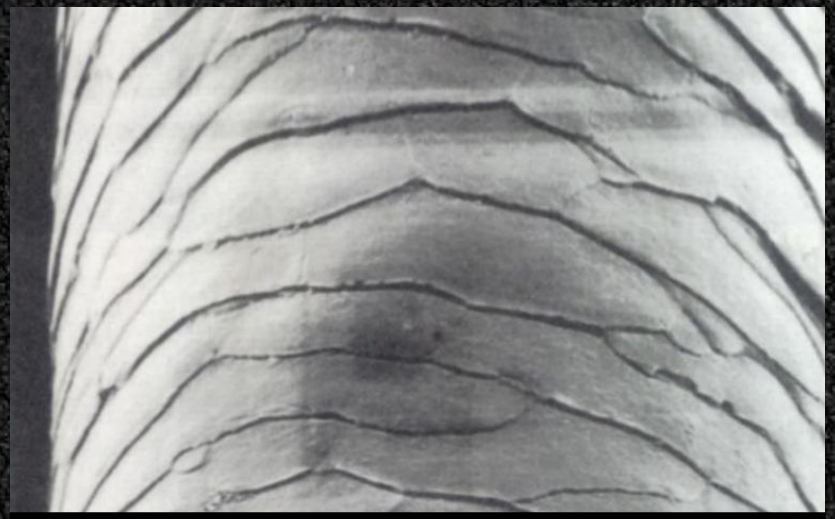
Download: [Paper PDF (17.0 MB)]



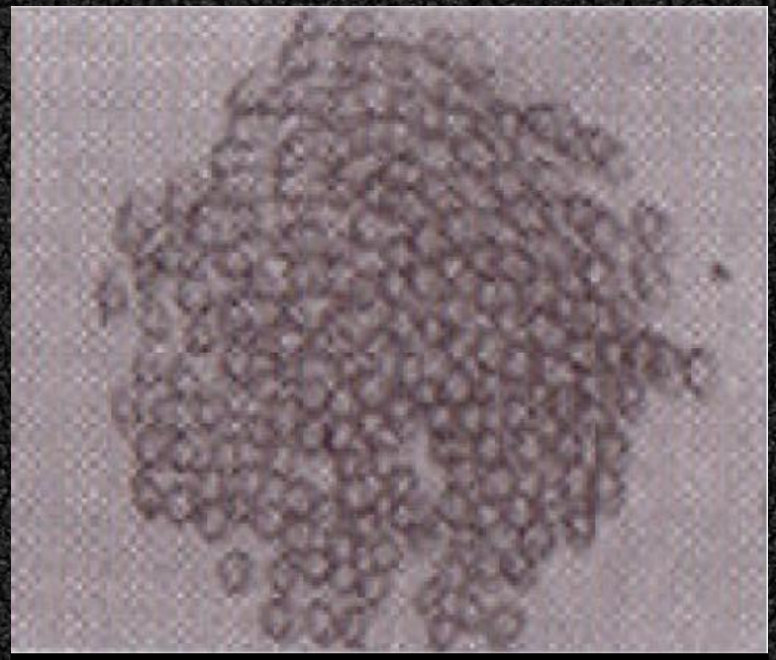
(a) CT Measurements (b) Fitted procedural yarns (c) Rendered full textiles

- [2016 SIGGRAPH] 依据纱线的自然结构提出一个基于纤维的几何模型，显式地对纤维、单纱、纱线的关系进行表示。其从CT图片重建体素模型，并通过模型匹配算法从体素模型中得到几何模型所需的参数，从而过程式地对纱线进行生成，并对体素模型的数据和匹配算法进行了开源。

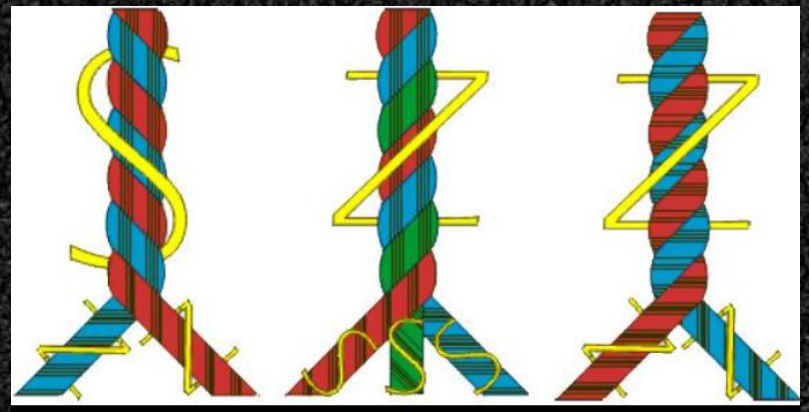
使用纤维表示织物：织物的自然结构



纤维是指自然或人造的细小长条形状物质



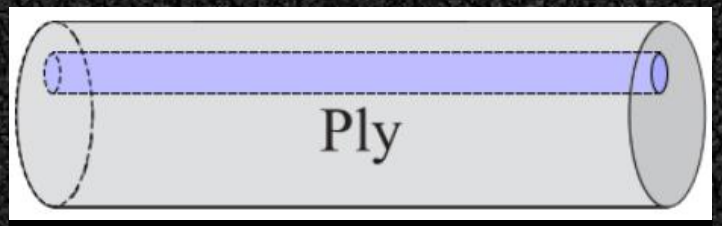
单纱是由纤维组成的具有一定粗度和强度的长条



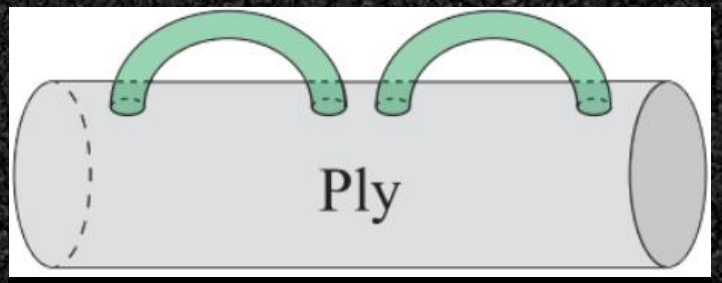
纱线是由两根以上的单纱缠绕、捻合形成的长线

三者的关系：纤维缠绕组成单纱，单纱缠绕形成纱线

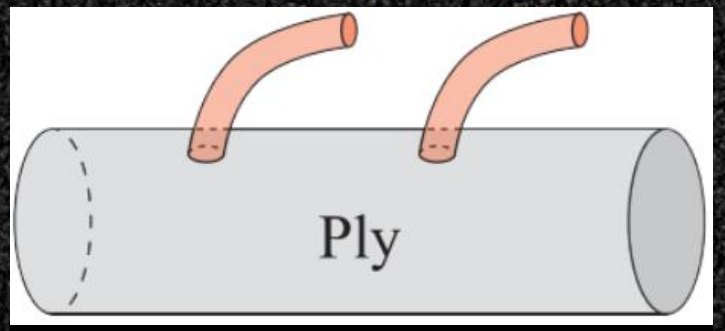
使用纤维表示织物：织物的自然结构



常规纤维



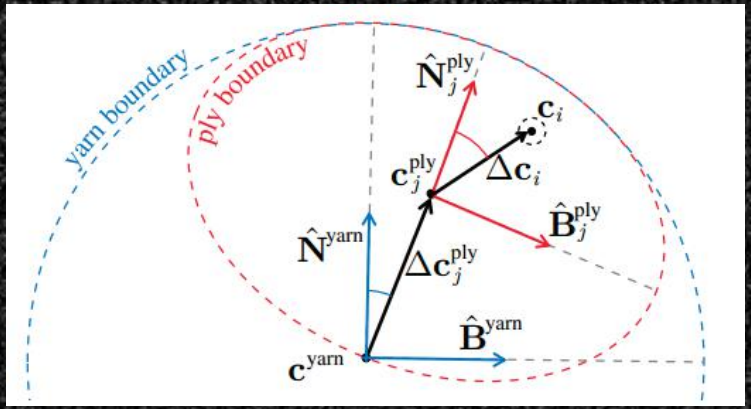
环形纤维



自由纤维

- 在加工过程中或者日常生活的磨损中，单纱中的纤维会被拉出或截断，形成毛绒外观。

Cornell University：几何模型



- 基于纱线中心对单纱中心在XOY平面上进行求解。每条单纱都有一个初始角度，其中第j条单纱的初始角度为：

$$\theta_j^{ply} = \frac{2\pi j}{n_{ply}}$$

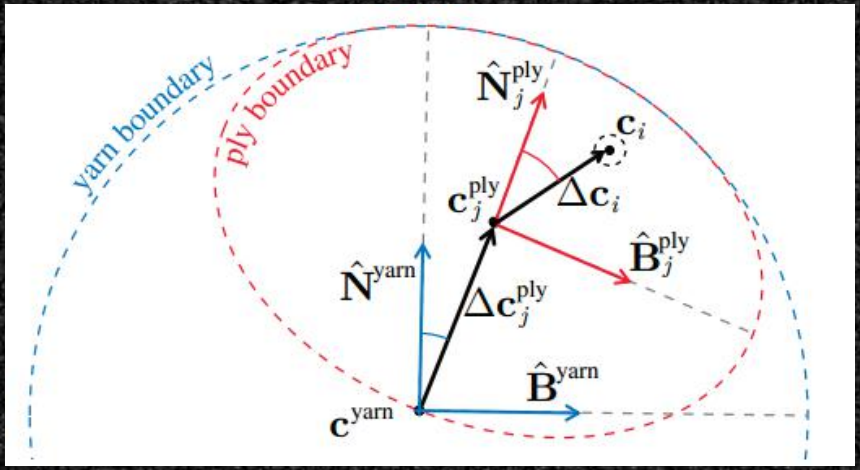
沿着z轴单纱进行周期性缠绕，其旋转角θ可以通过如下进行求解，α为旋转因子：

$$\theta = \frac{2\pi z}{\alpha}$$

故给定z，第j条单纱中心的位置可以求解如下：

$$\mathrm{c}_j^{ply}(\theta) = [R^{ply}\cos(\theta_j^{ply}+\theta), R^{ply}\sin(\theta_j^{ply}+\theta), \frac{\alpha\theta}{2\pi}]^T$$

Cornell University：几何模型



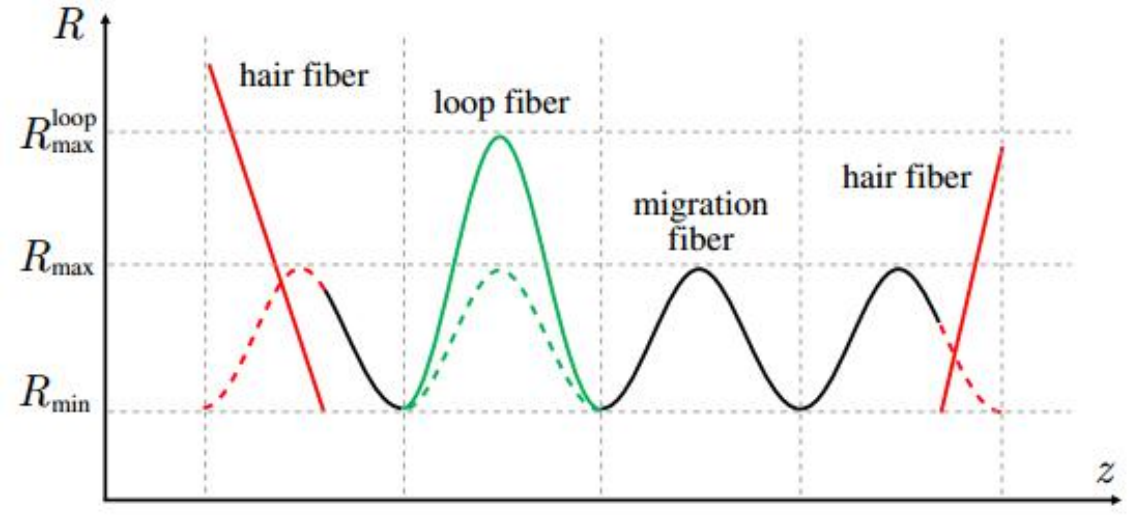
- 纤维中心位置的确定与单纱中心位置的确定类似，但其半径R会随着z轴的延展变化：

$$R_j(\theta) = \frac{R_{ji}}{2}(R_{\max} + R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min})\cos(\theta_{ji} + s\theta))$$

给定z轴位置，第j根单纱的第i根纤维的位置确定如下:

$$c_{ji}^{fiber}(\theta) = c_j^{ply}(\theta) \circ [R_j(\theta)\cos(\theta_{ji} + \theta), R_j(\theta)\sin(\theta_{ji} + \theta), 1]^T$$

Cornell University：几何模型



前述常规纤维的几何模型也非常适合于对环形纤维进行建模：

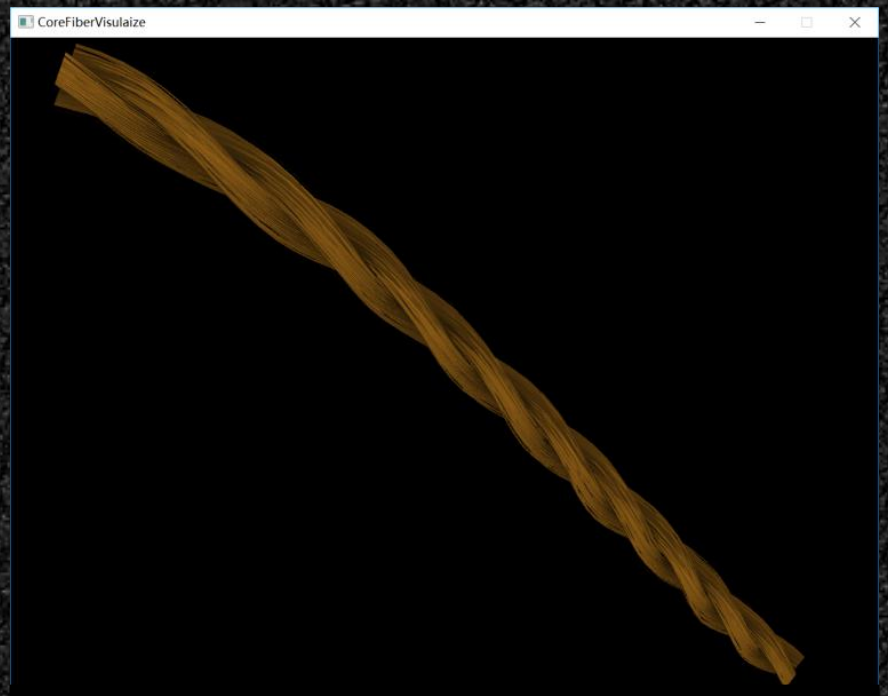
① 其中自由纤维只需要在常规纤维生成的过程中选取一个完整的周期，并选择一个比R_{max}大的半径进行代替，即可产生出被勾扯的效果。

② 自由纤维的生成可以在常规纤维的任意周期中令半径R突变为从比R_{max}大的数值，然后线性下降到Rmin，也可以在所有纤维生成完毕后任意选取一个z轴区间执行上述操作。

在GPU中对纱线几何模型进行生成：核心纤维

- 对于输入的纱线中心控制点，细分着色器将纱线一分为三，加入几何着色器通过公告牌技术将对等值线扩展为始终朝向视点的核心纤维面片。

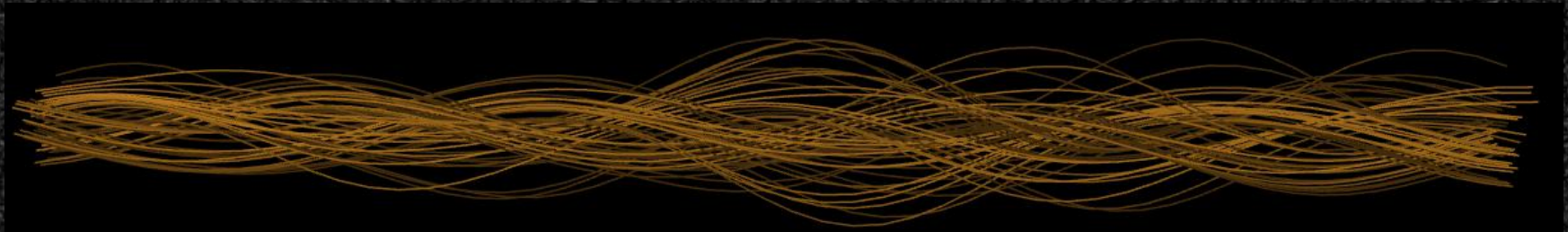
细分着色器



几何着色器

在GPU中对纱线几何模型进行生成：非核心纤维

- 在程序中对纤维周期所属的类型通过随机数进行确定。不同类型纤维的区别在于最大半径R_max，故直接对周期相应的半径进行存储，并作为一维纹理传入着色器，使得细分计算着色器可以避免分支判断直接对环形纤维进行生成：



常规纤维+环形纤维

在GPU中对纱线几何模型进行生成：非核心纤维

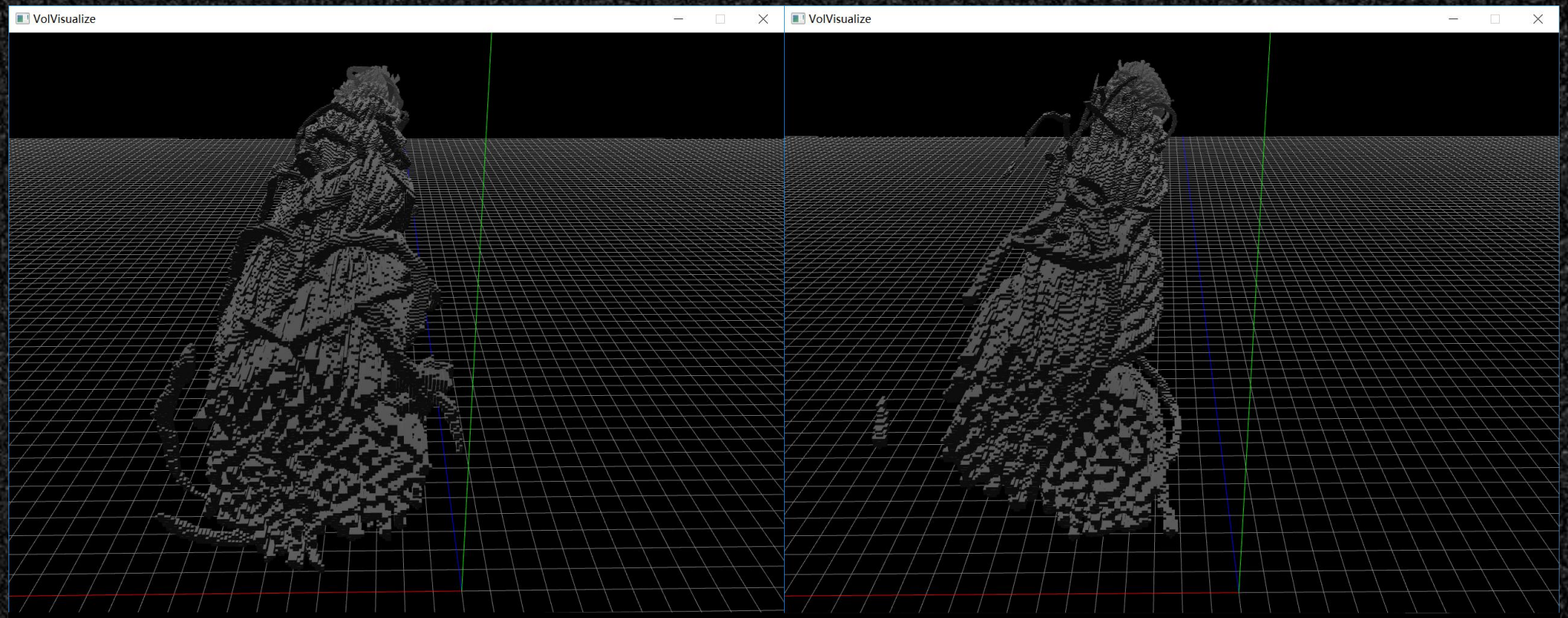
- 自由纤维由于其半径在单个周期中呈线性变化，所以对自由纤维的分支判断不可避免：

常规纤维+自由纤维

- 对非核心纤维中的三种类型纤维组合如下：

常规纤维+环形纤维+自由纤维

Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering



体素数据

Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering

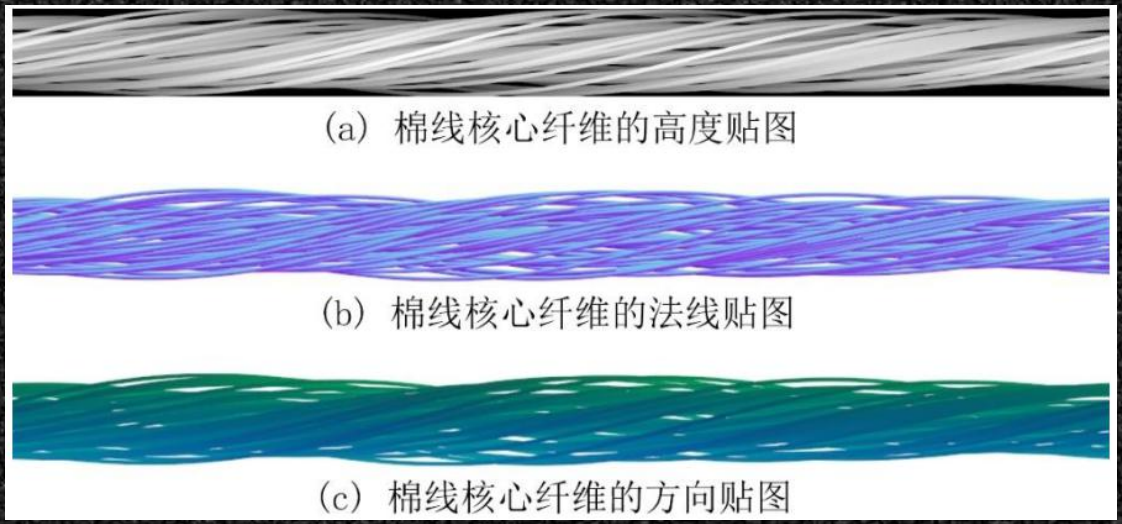
config_step2.txt - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

```
ply_num: 3
fiber_num: 75

aabb_min: [-0.0538006,-0.0538006,-0.488648]
aabb_max: [0.0538006,0.0538006,0.488648]

z_step_size: 0.01
z_step_num: 98
fly_step_size: 0

yarn_clock_wise: 0
fiber_clock_wise: 1
yarn_alpha: 0.452737
alpha: 0.367144

yarn_radius: 0.0378238
ellipse_long: 0.0257183
ellipse_short: 0.0200419

epsilon: 0
beta: 0.083475
R_max: 1

use_migration: 1
s_i: 1.1
rho_min: 0.75
rho_max: 1

use_flyaways: 1
flyaway_hair_density: 34.7899
```

- 几何模型所需的参数几乎都可以从模型匹配算法中得到，至于纤维初始半径和角度则可以通过给定组成体素模型初始横截面的所有立方体位置中进行匹配获取。

核心思想



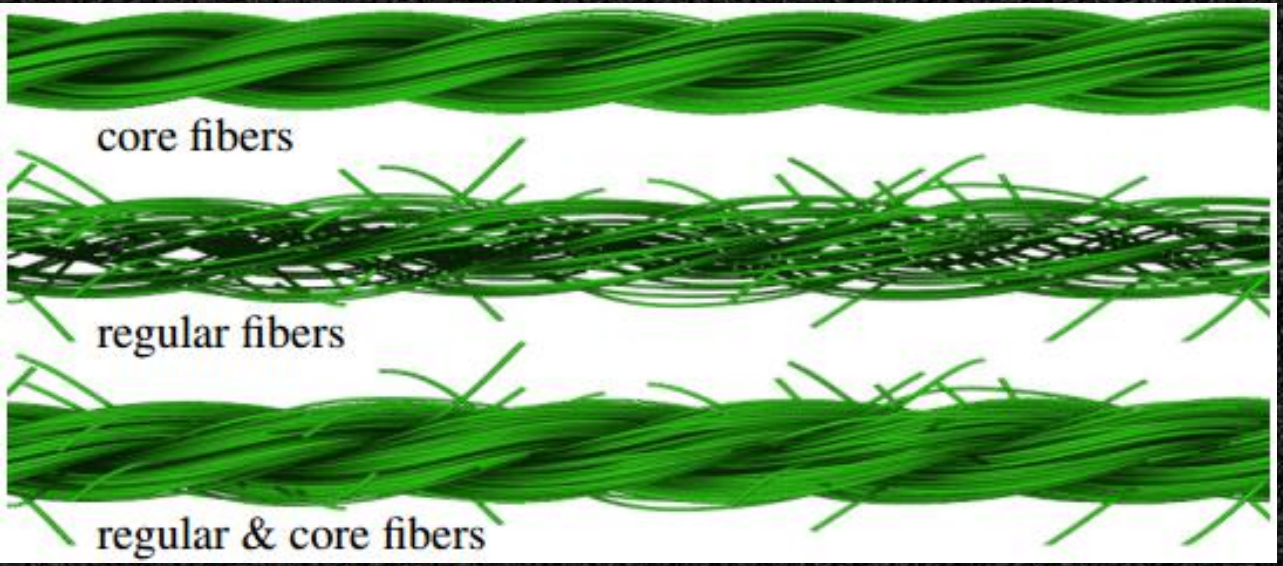
核心纤维贴图的生成：

① 康奈尔大学提供了众多的纱线类型，选择特定种类纱线的参数

② 在纱线空间中将单纱中心对齐到z轴，并在CPU中对一个周期的单纱进行生成。

③ 对单纱进行渲染，并利用openGL的帧缓存技术对单纱上的法向量、高度以及方向分别渲染到三张纹理图片中。

Real-time Fiber-level Cloth Rendering



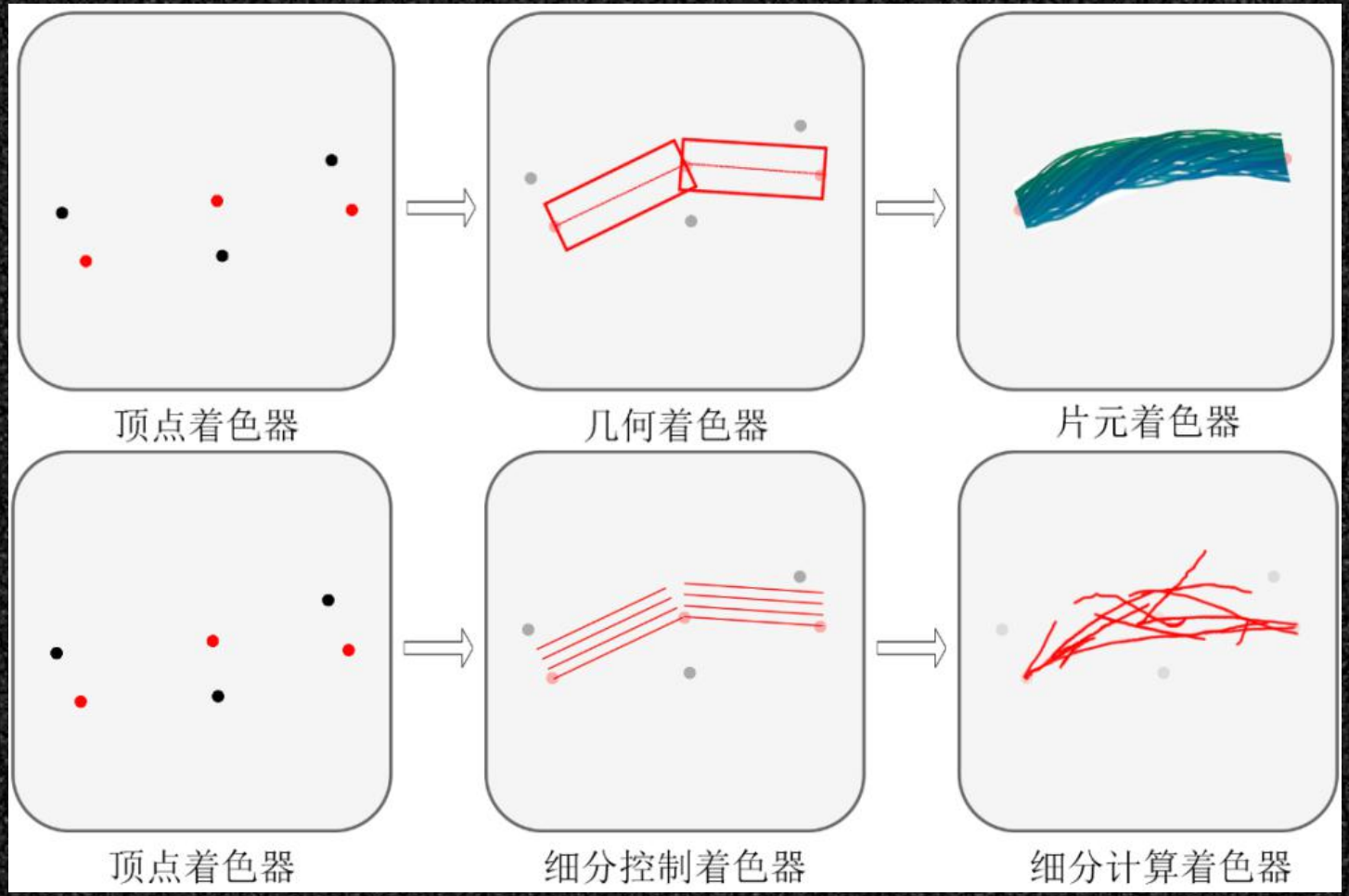
- 对于一根单纱，绝大多数纤维都是规律缠绕的，故其核心思想在于将一根单纱分为核心纤维和非核心纤维：核心纤维使用贴图，非核心纤维则利用openGL的细分着色器进行生成。

核心思想

- 几何着色器：输入一个图元（如点或三角形）的一组顶点，几何着色器可以在顶点发送到下一着色器阶段之前对它们随意变换。它能够将（这一组）顶点变换为完全不同的图元，并且还能生成比原来更多的顶点。

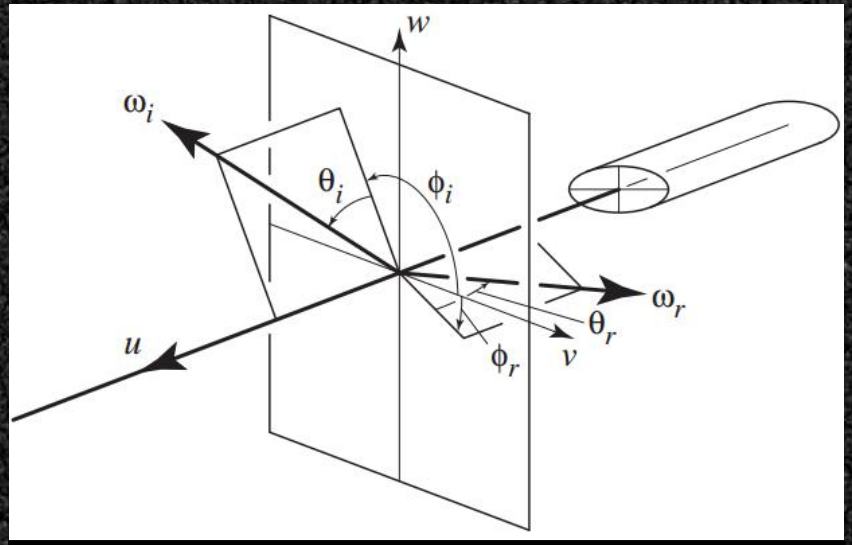
- 细分着色器：OpenGL 4.0加入的新特性，位于顶点着色器之后，几何着色器之前，由细分控制着色器和细分计算着色器组成，如上所示，可以对输入的一条直线两个顶点在横向和纵向进行细分。

核心思想



算法改进

在GPU中对纱线几何模型进行生成：着色模型

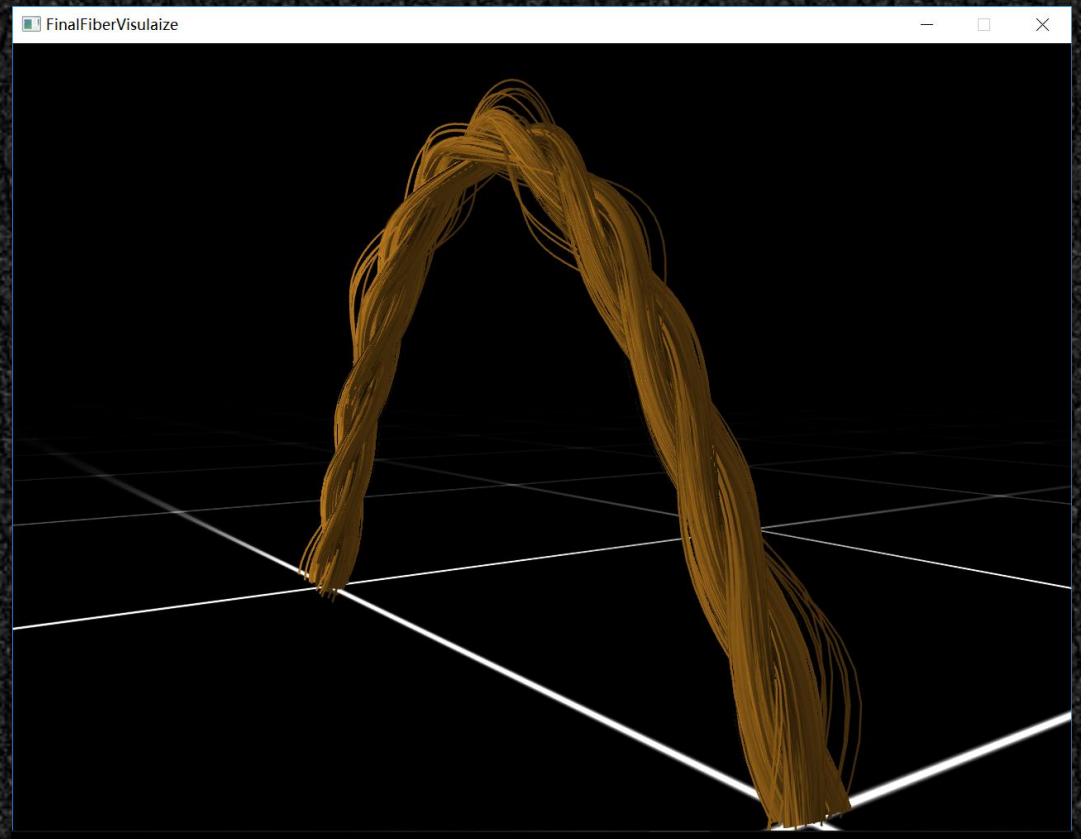


柱状体散射模型的几何符号表示

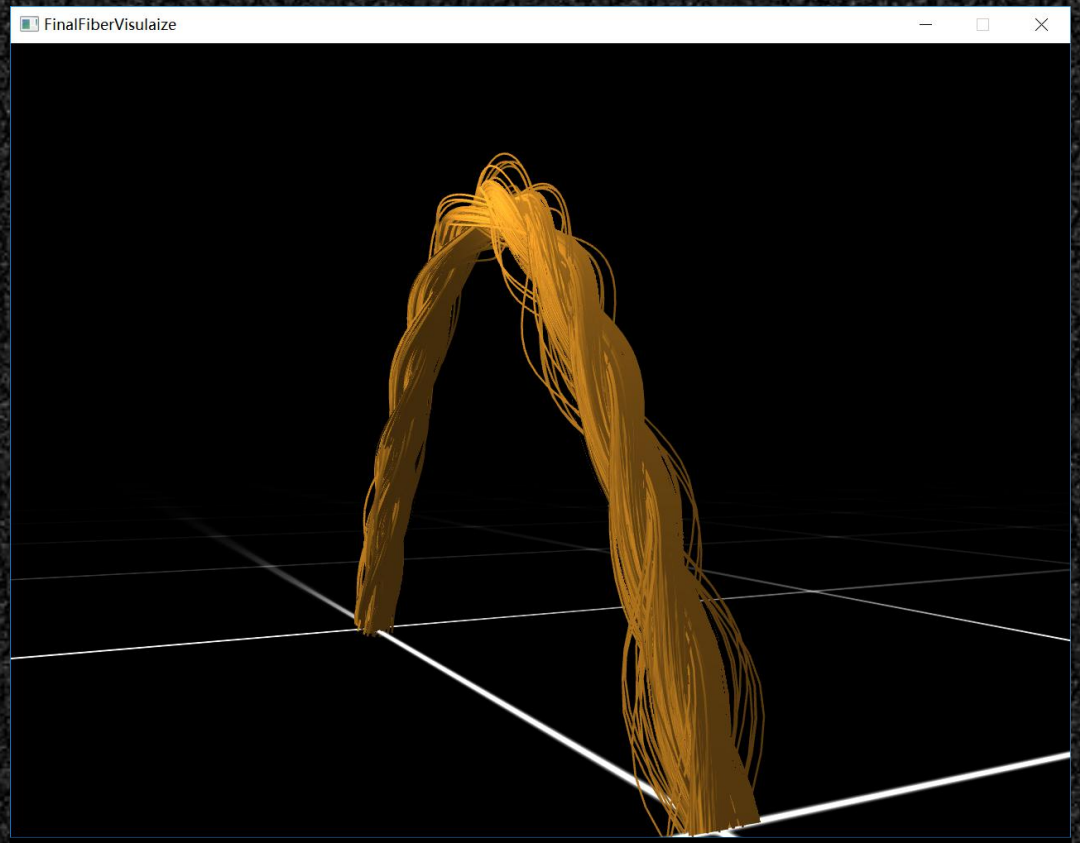
- 纤维的光散射模型同样由环境光、漫反射光、镜面反射光三部分组成，其中环境光和漫反射光都与Phong光照模型相一致，但镜面反射采用了柱状物体的散射模型。计算如下：

$$f_{\text{specular}} = k_{\text{specular}} \cos(\phi/2) \exp(-\theta_h^2/2\beta^2)$$

在GPU中对纱线几何模型进行生成：着色模型



Phong光照模型



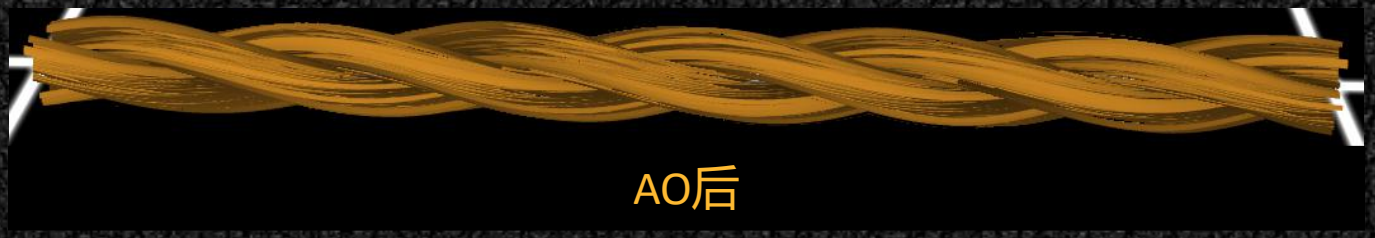
论文着色模型

在GPU中对纱线几何模型进行生成：基于距离的简单AO

- 一种间接光照的模拟叫做环境光遮蔽(Ambient Occlusion)，它的原理是通过将褶皱、孔洞和非常靠近的墙面变暗的方法近似模拟出间接光照。这些区域很大程度上是被周围的几何体遮蔽的，光线会很难流失，所以这些地方看起来会更暗一些。

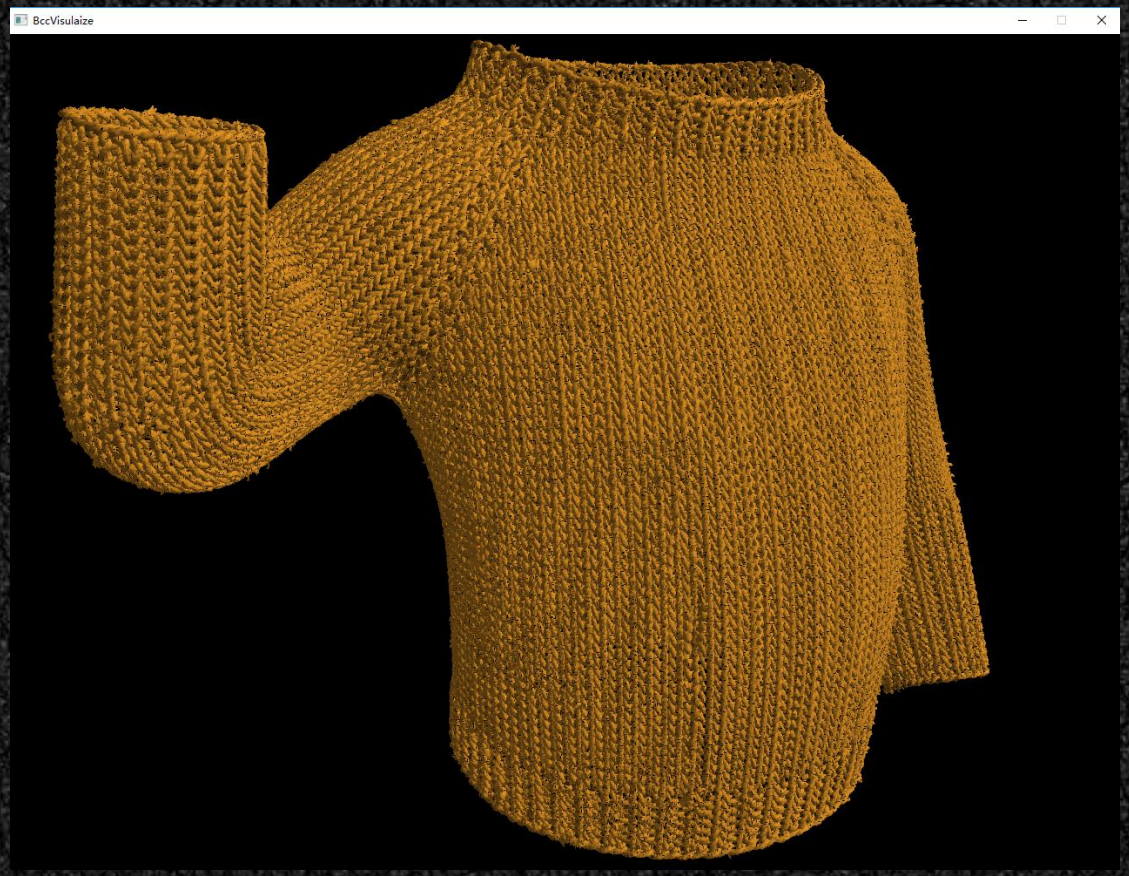
  对于纱线，论文采用了一种简单的模型来对环境光遮蔽进行近似：依据与单纱中心的距离来对环境光进行缩放。使用AO前后对比如下：

AO前



AO后

在GPU中对纱线几何模型进行生成：完整织物模型



在GPU中对纱线几何模型进行生成：LOD，层次细节优化

- 纱线随着视点的远离会变得越来越细，这使得可以通过单纱与纤维的直径所占的屏幕像素宽度来对单纱所细分出来的纤维数量进行调整。给定阈值ω_{LOD}，论文对LOD缩放系数求解如下：

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \text{if } \omega^{\text{LoD}} \leq \omega^{\text{fiber}} \\ 0, & \text{if } \omega^{\text{ply}} \leq \omega^{\text{LoD}} \\ \frac{\omega^{\text{fiber}}}{\omega^{\text{LoD}}} \left(\frac{\omega^{\text{ply}} - \omega^{\text{LoD}}}{\omega^{\text{ply}} - \omega^{\text{fiber}}} \right), & \text{otherwise,} \end{cases}$$

- 令N_{fiber}为最大可细分纤维数量，在细分控制着色器中对实际纤维数量调整如下：

$$n = n_{fiber}^{\max} * \lambda^2$$

在GPU中对纱线几何模型进行生成：LOD，层次细节优化

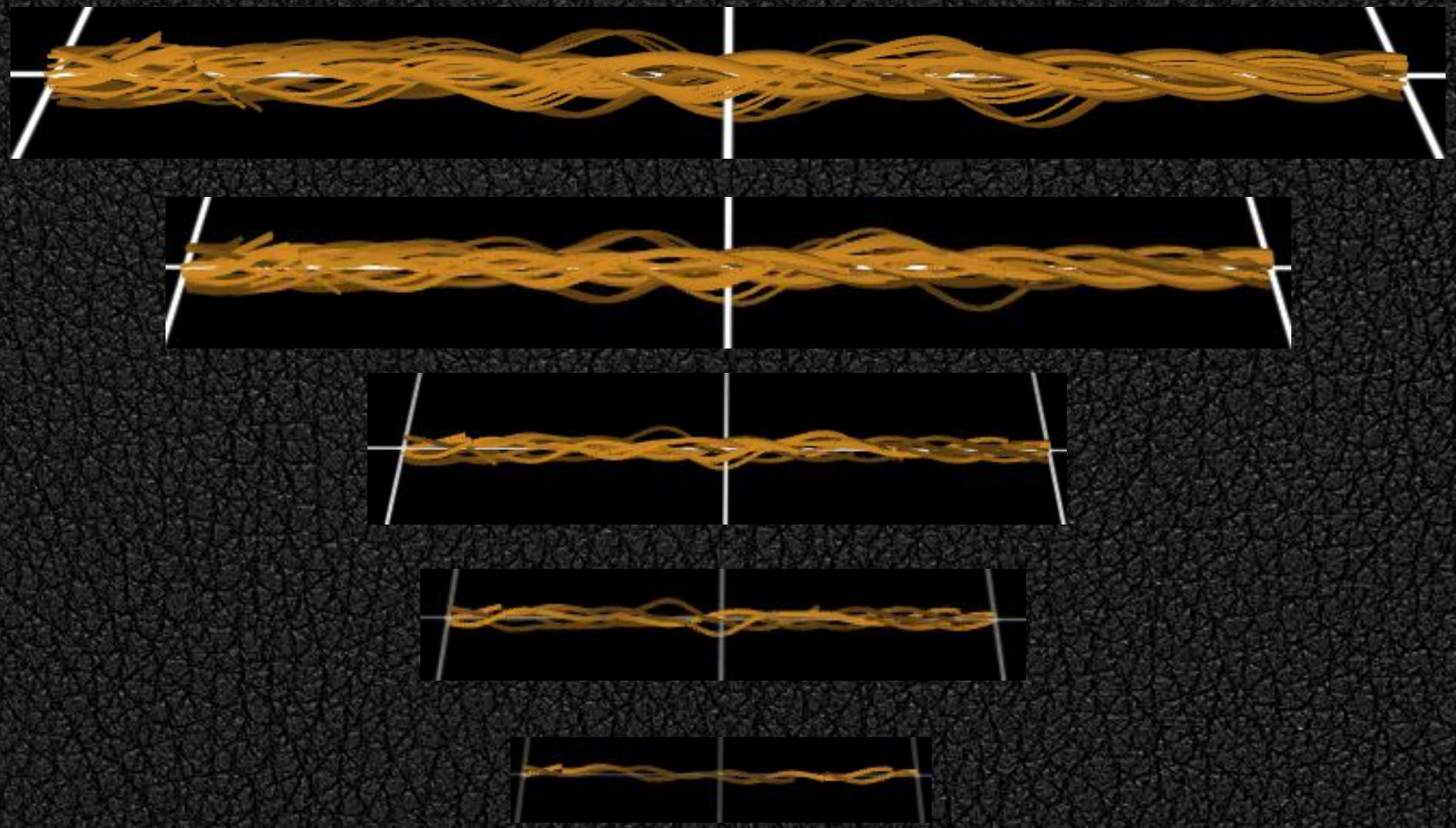
- 关于单纱直径屏幕像素宽度的求解，可以将单纱中心与纱线中心对齐，然后以视点连线方向为法向量对直径的两个端点进行扩展，再从世界坐标转换到屏幕像素坐标。纤维的像素宽度可以通过比例常量进行计算：

$$\frac{\omega_{fiber}}{\omega_{ply}} = \frac{R_{fiber}}{R_{ply}}$$

- 因为在GPU的裁剪之前进行了变换，所以还可以提前判断顶点是否位于投影面之外，对两端都位于屏幕之外的纱线不进行纤维的细分。需要说明的是由于纱线段很短，所以将两端位于屏幕外但穿过屏幕的情况进行相同的处理。

在GPU中对纱线几何模型进行生成：LOD，层次细节优化

近



远

在GPU中对纱线几何模型进行生成：LOD，层次细节优化

近

远

在GPU中对纱线几何模型进行生成：核心纤维的动态补偿

- 随着视点的远离，纤维数量减少，织物会显得单薄，故使用前面的λ^2对核心纤维的半径进行补偿，使得远处观察织物依然丰富：

补偿前

补偿后

在GPU中对纱线几何模型进行生成：将两遍渲染进行合并

- 前面的结果均由核心纤维贴图与非核心纤维两次渲染生成。两者都以纱线控制点作为输入，分开渲染是因为核心纤维贴图需要在细分着色器之后使用几何着色器将等值线线扩展成四边形面片，而非核心纤维只需要细分着色器参与。这样实现的好处是逻辑清晰，然而两次渲染中存在大量可以复用的数据，且织物的控制点数量庞大，绘制调用过多会很快达到性能瓶颈。以下列毛衣为例，共有146条曲线，14W+的顶点：

Alien Sweater Cables

Download:	**alien_sweater_cables.bcc**
Curve Type:	Catmull-Rom (uniform)
File size:	1.6 MB
Curve count:	146
Control points:	142,654

*Yarn-level model by Cem Yuksel. Cloth surface by **Rune Spaans**. Alien character model by **Christer Sveen**.*

在GPU中对纱线几何模型进行生成：将两遍渲染进行合并

- 思路：一根纱线控制点细分为63根纤维，每条单纱平均21根，将第1条扩展成核心纤维面片，其余的20条为非核心纤维。但是由于都需要经过几何着色器，输入的线段不能再以线段的形式进行输出，故也以一个很小的宽度对非核心纤维进行扩展：

在GPU中对纱线几何模型进行生成：将两遍渲染进行合并

两遍渲染

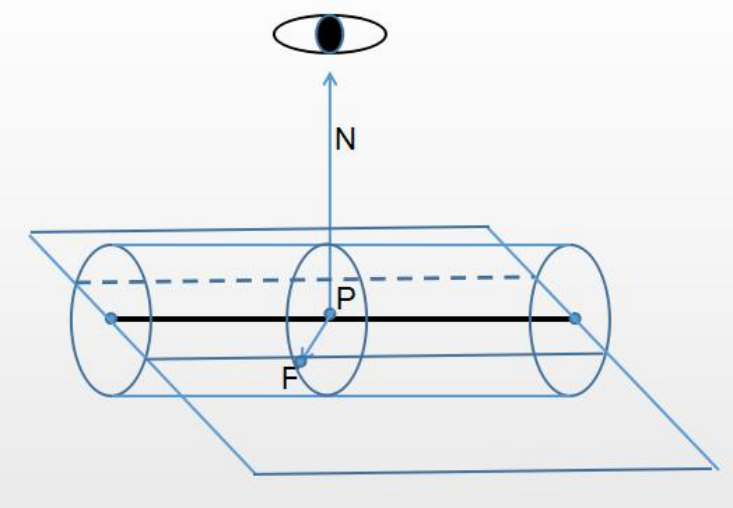
在GPU中对纱线几何模型进行生成：将两遍渲染进行合并

一遍渲染

毛绒感极大的增强

在GPU中对纱线几何模型进行生成：对半柱体进行剔除

- 对于每根单纱，细分出来的纤维裹成一个圆柱，然后中间有一张始终朝向视点的核心纤维贴图，这张贴图相当于圆柱的横截面，始终有一半的纤维会被这个纤维进行遮挡：



在GPU中对纱线几何模型进行生成：对半柱体进行剔除

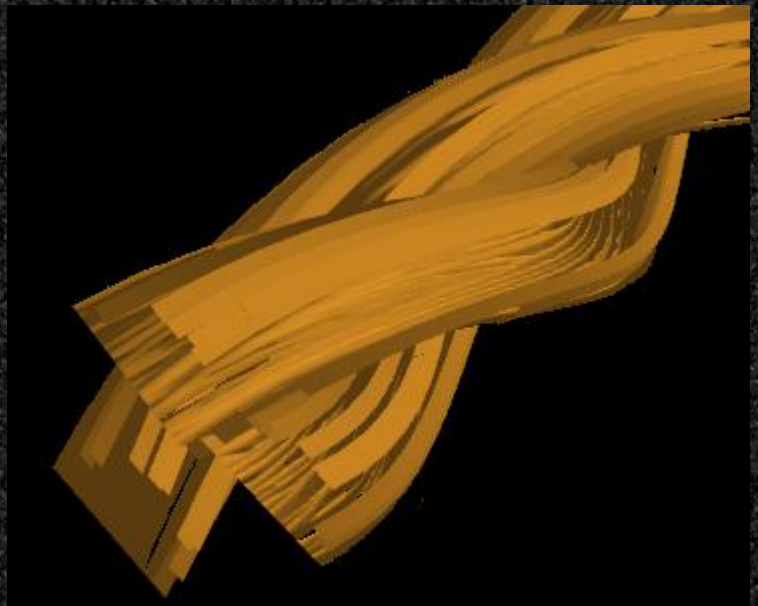
- 位于视点一侧的半圆柱为可视区域，另一侧的半圆柱为不可视区域。所以可以根据视点与面片的关系，对位于核心纤维贴图面片下方的纤维进行剔除：

$$\cos\theta = \overrightarrow{pf} \bullet \overrightarrow{N}$$

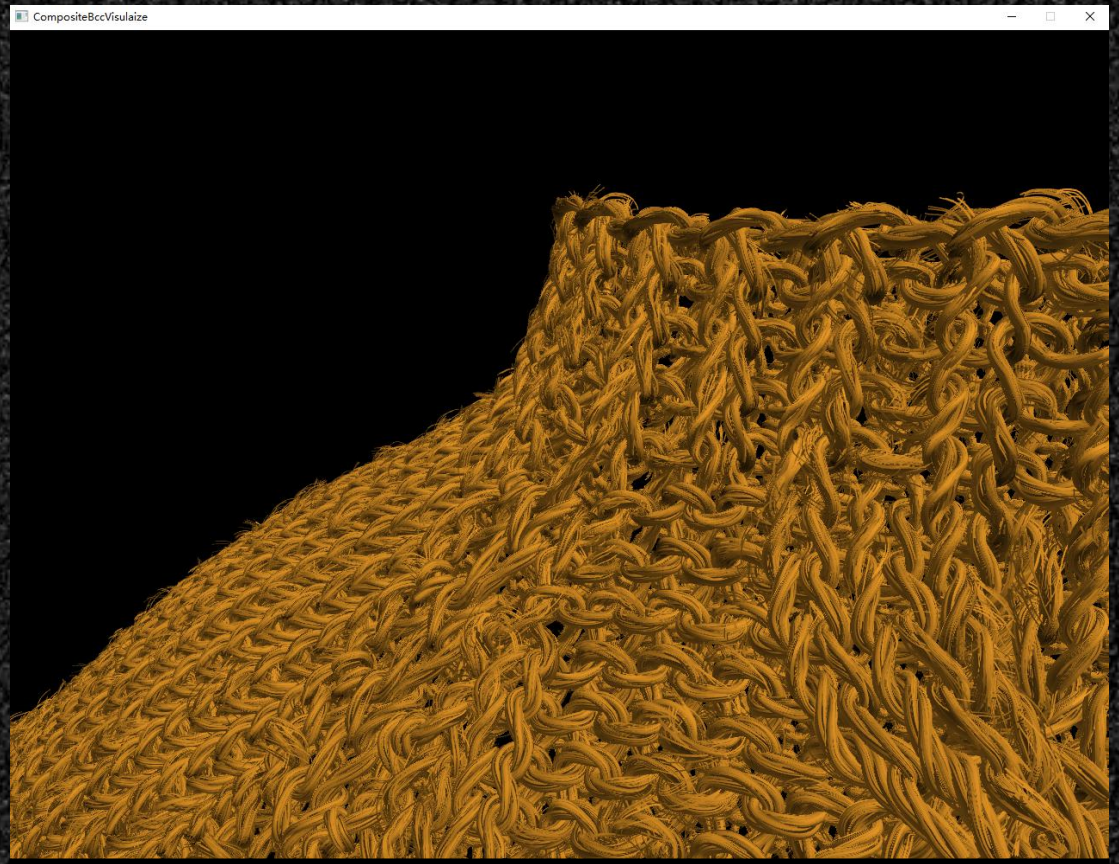
- cosθ < 0表示纤维位于遮挡区域，但是还需要进一步进行判断，因为环形纤维与自由纤维会超出核心纤维面片。故进一步对纤维在双副切线方向进行投影，若投影长度小于单纱半径，则说明该纤维中心完全处于遮挡区域，对视点不可见：

$$proj_{pf} < ply_radius$$

在GPU中对纱线几何模型进行生成：对半柱体进行剔除



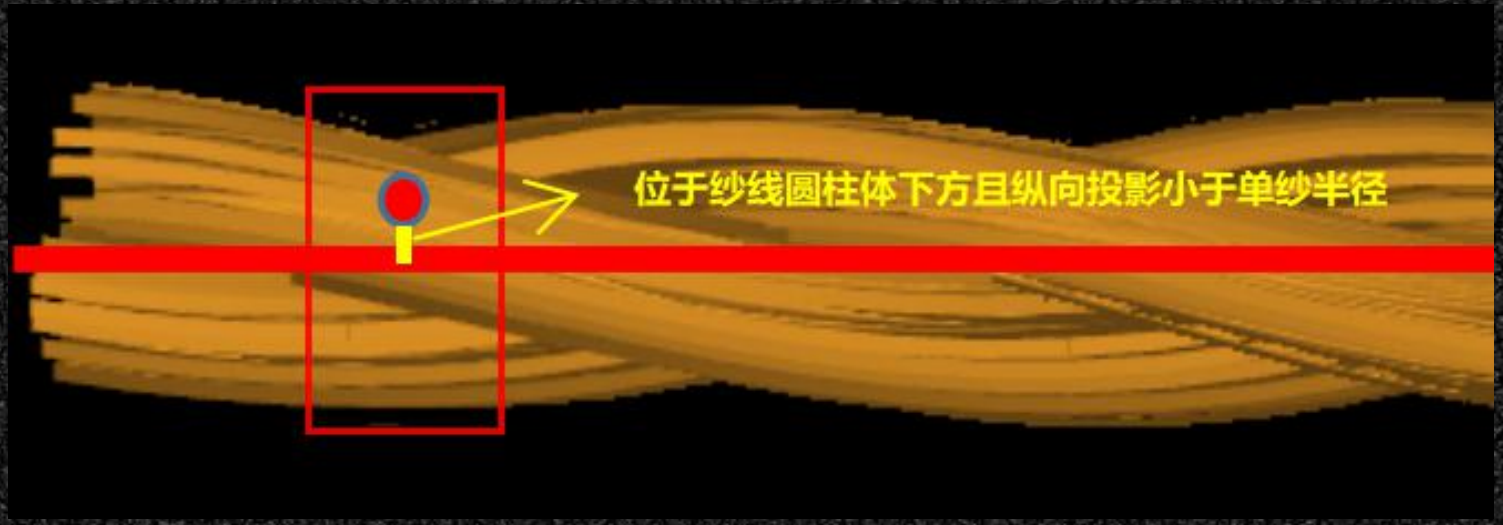
仅半个圆柱的纤维可见



AMD D700 7FPS->12FPS，RTX 2070 66FPS->80FPS

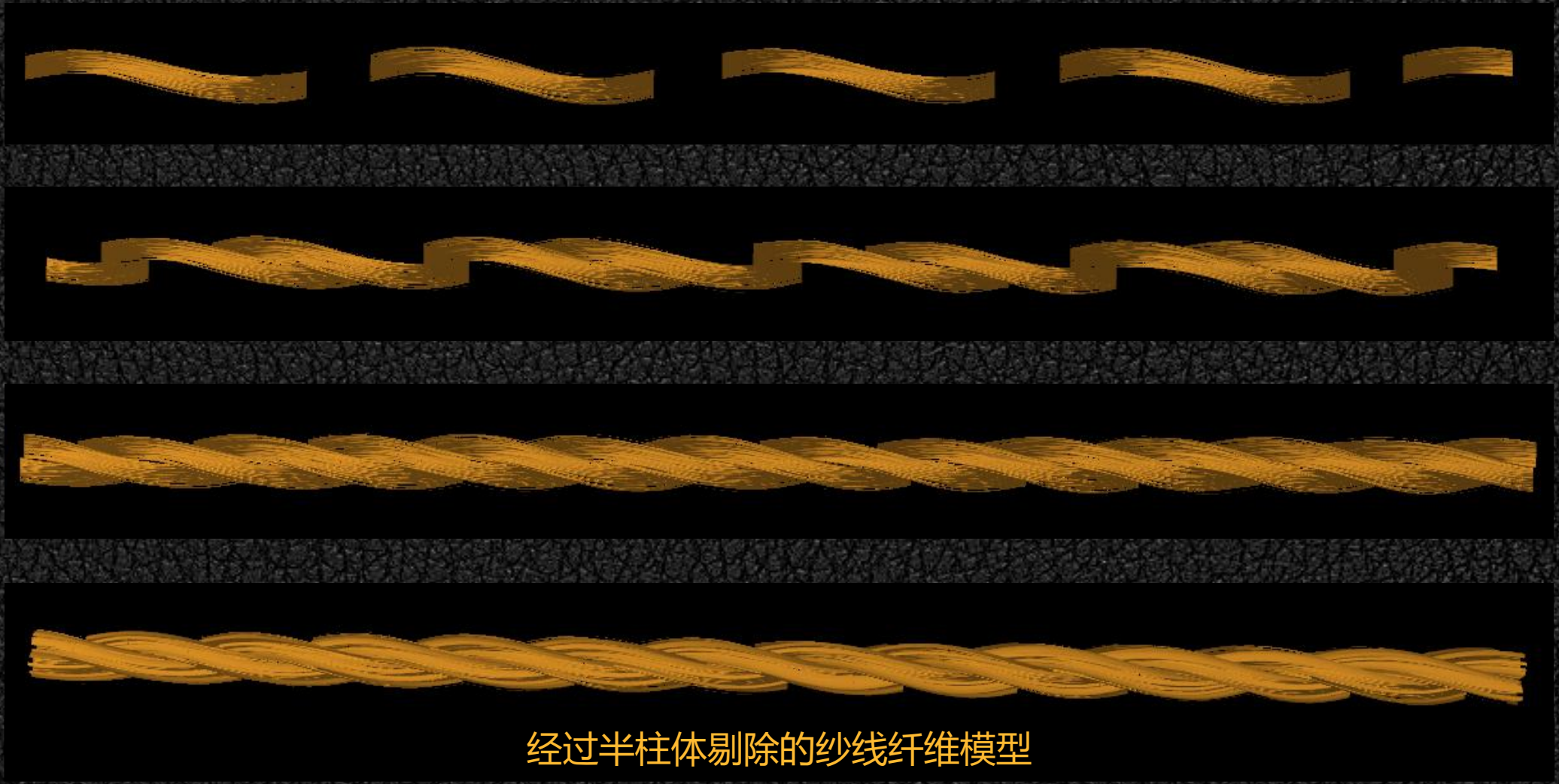
在GPU中对纱线几何模型进行生成：对半柱体进行剔除

- 对于单纱半圆柱体剔除的思想同样可以运用在纱线圆柱体上，如下图所示：



在GPU中对纱线几何模型进行生成：对半柱体进行剔除

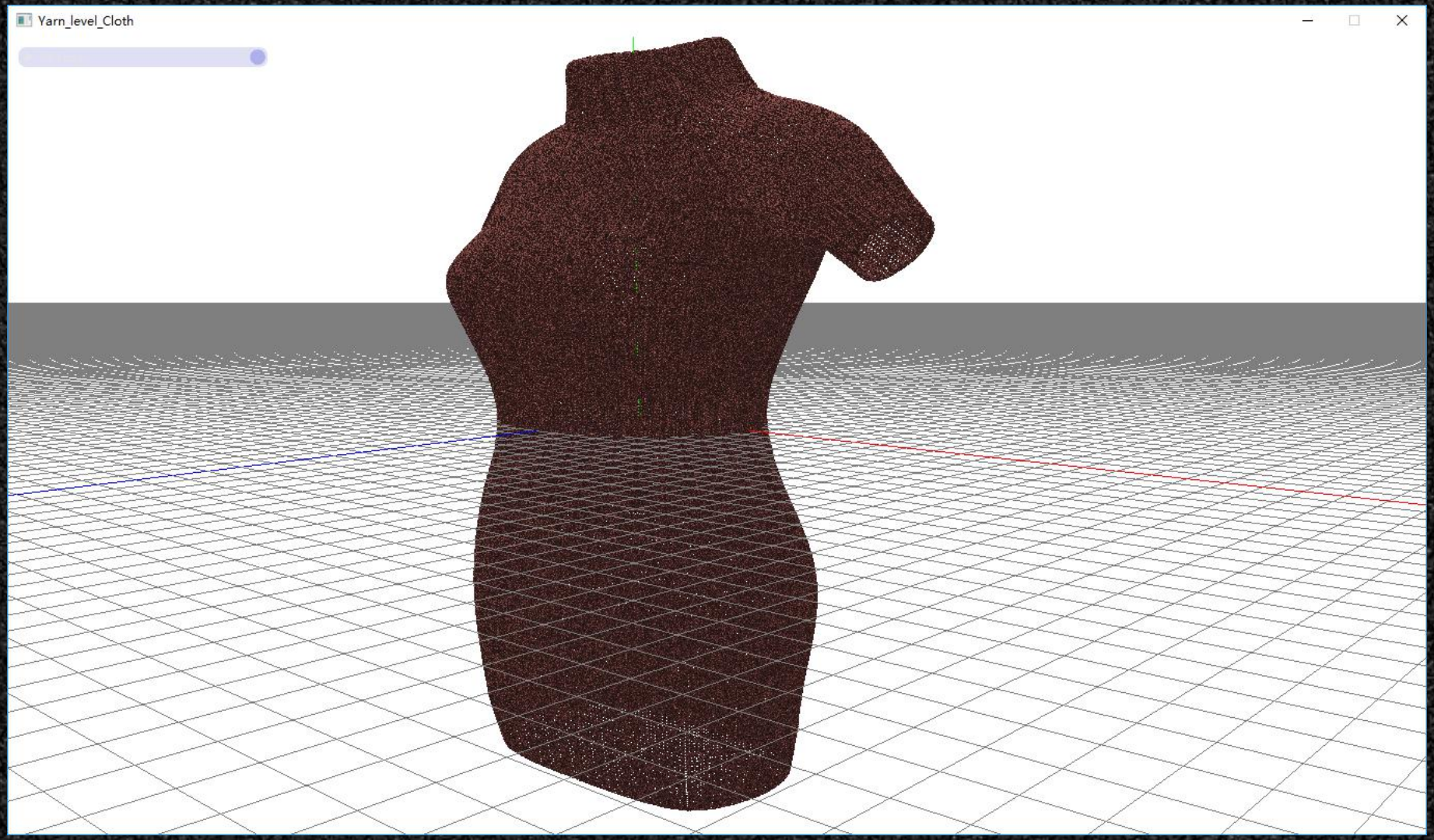
对因重叠被剔除的核心纤维面片进行可视化



经过半柱体剔除的纱线纤维模型

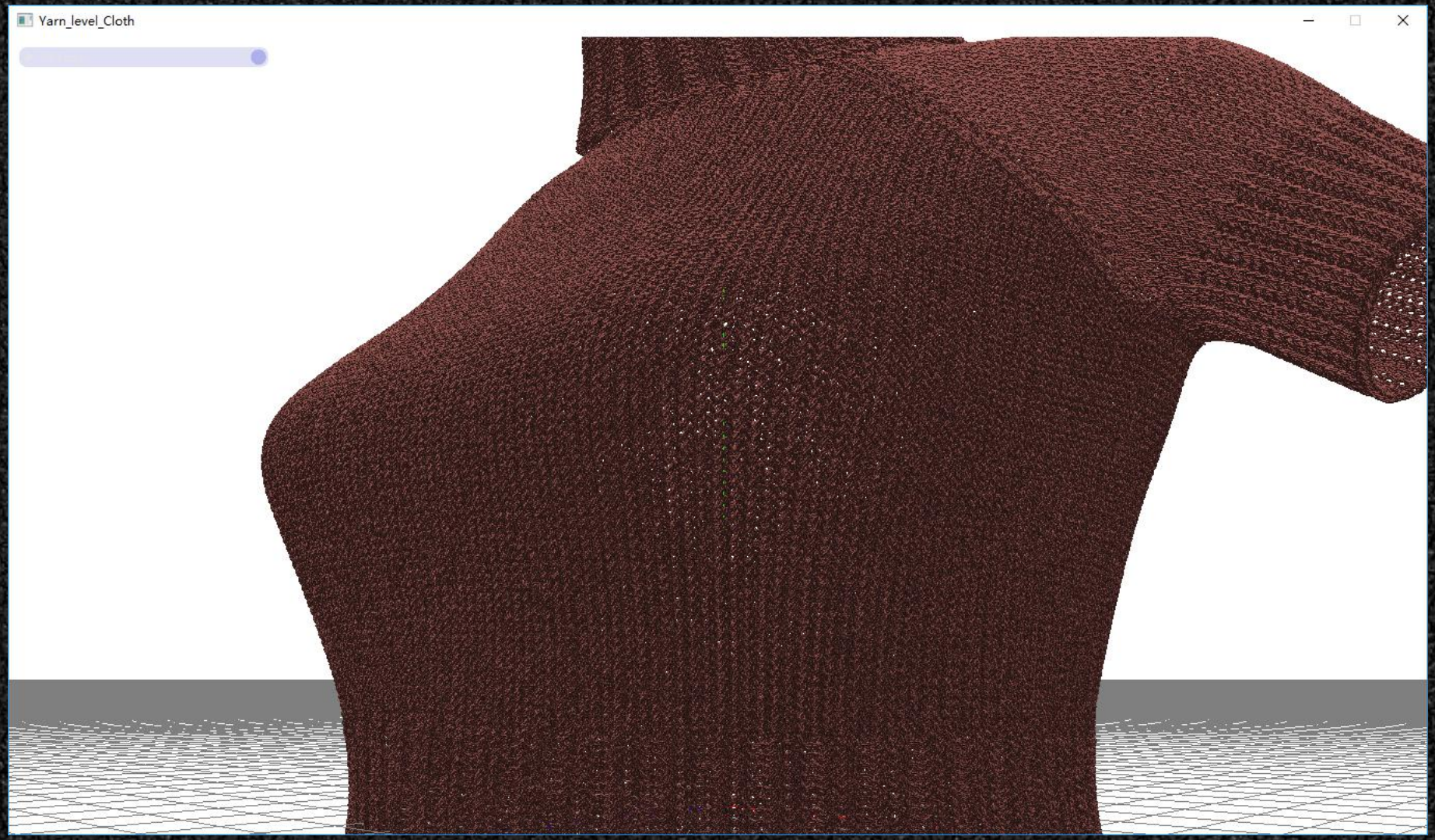
结果展示

结果展示

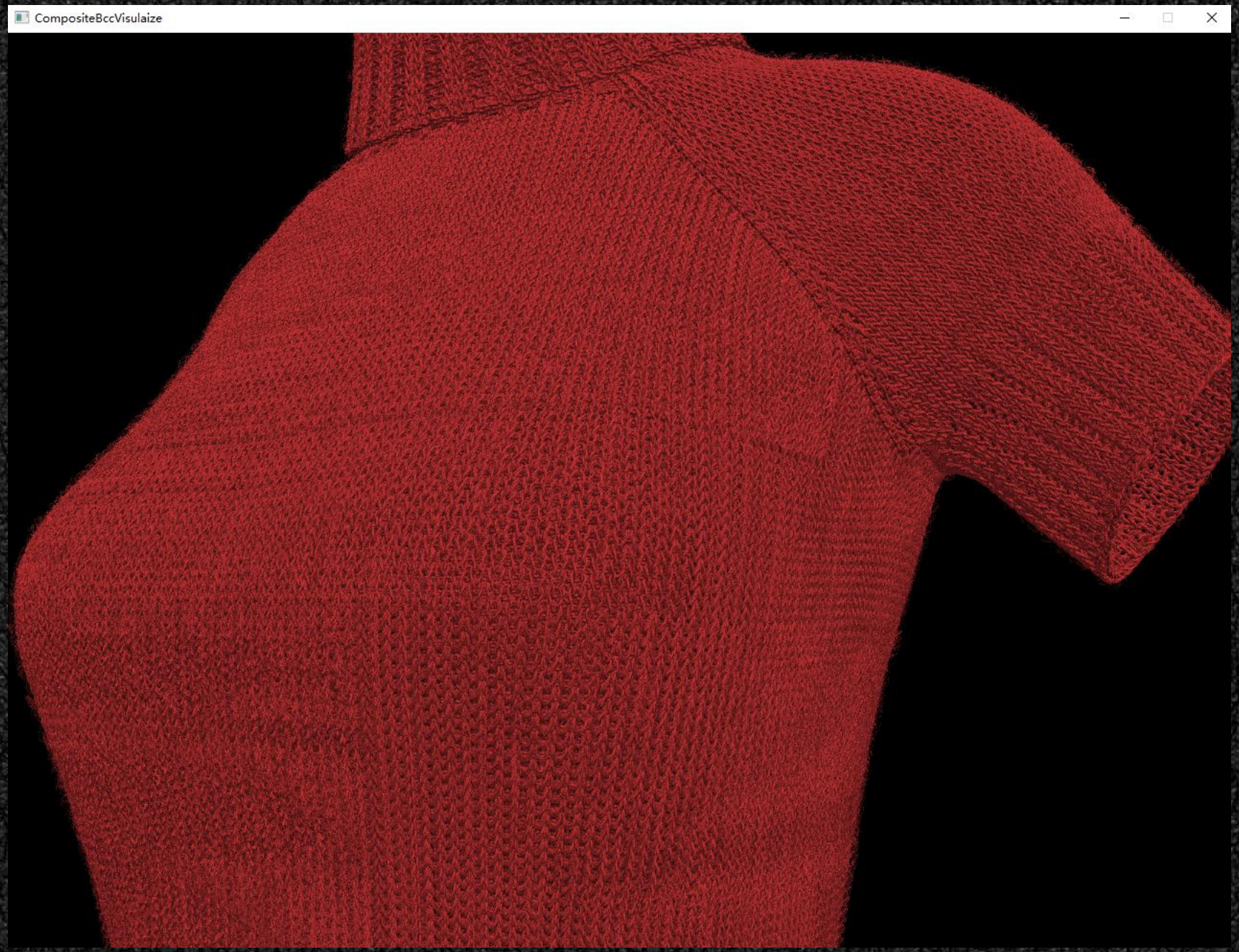


结果展示

结果展示

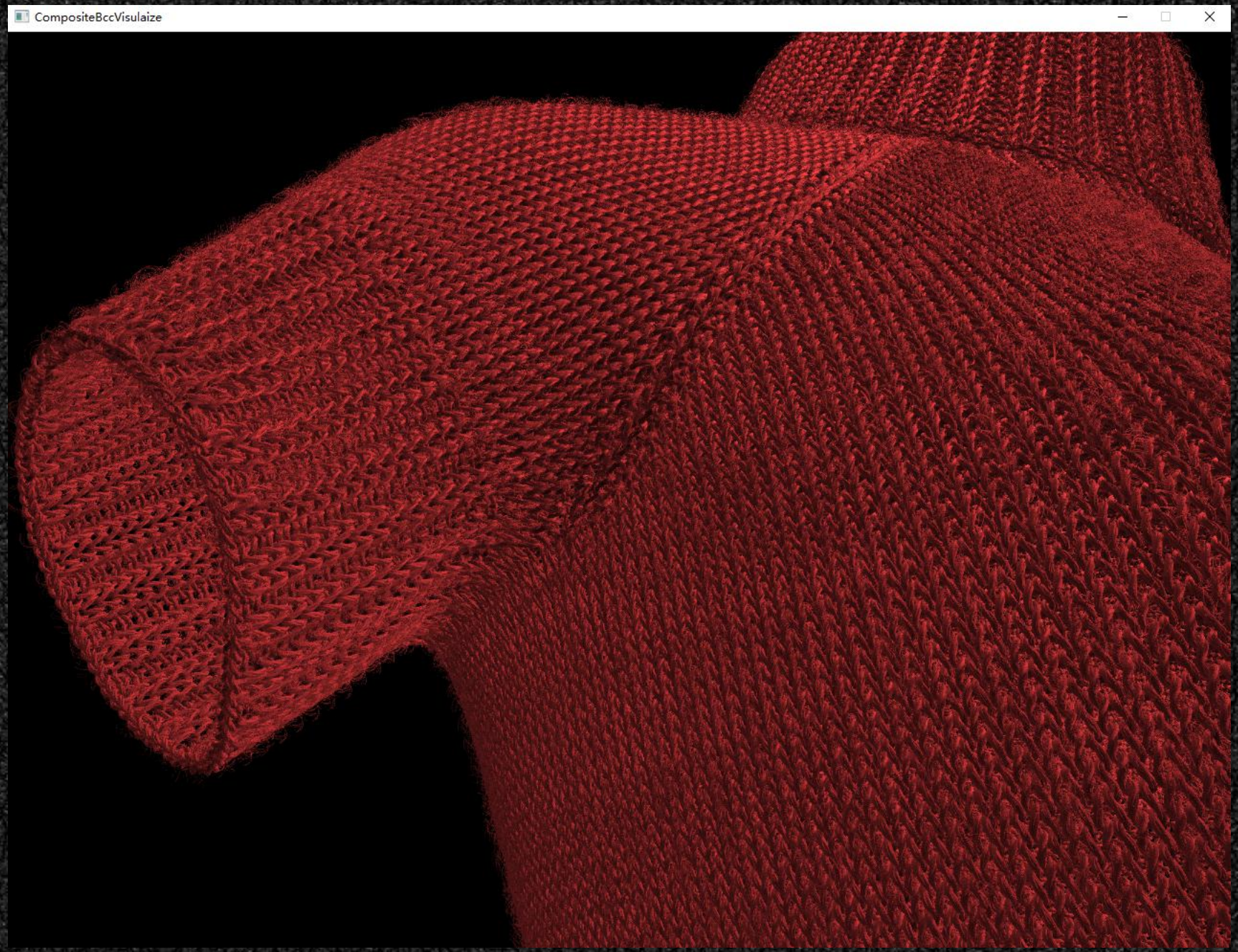


结果展示

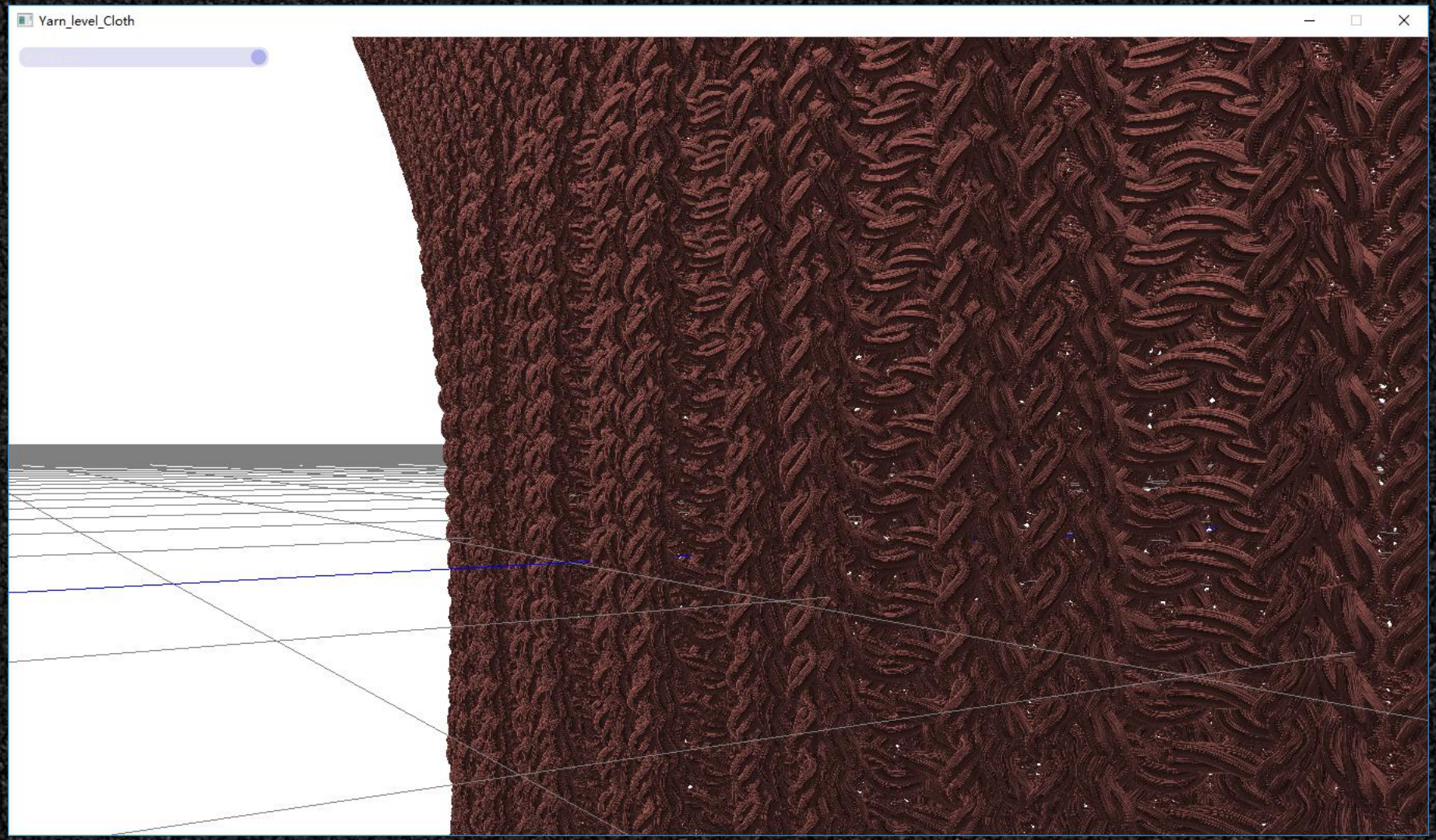


结果展示

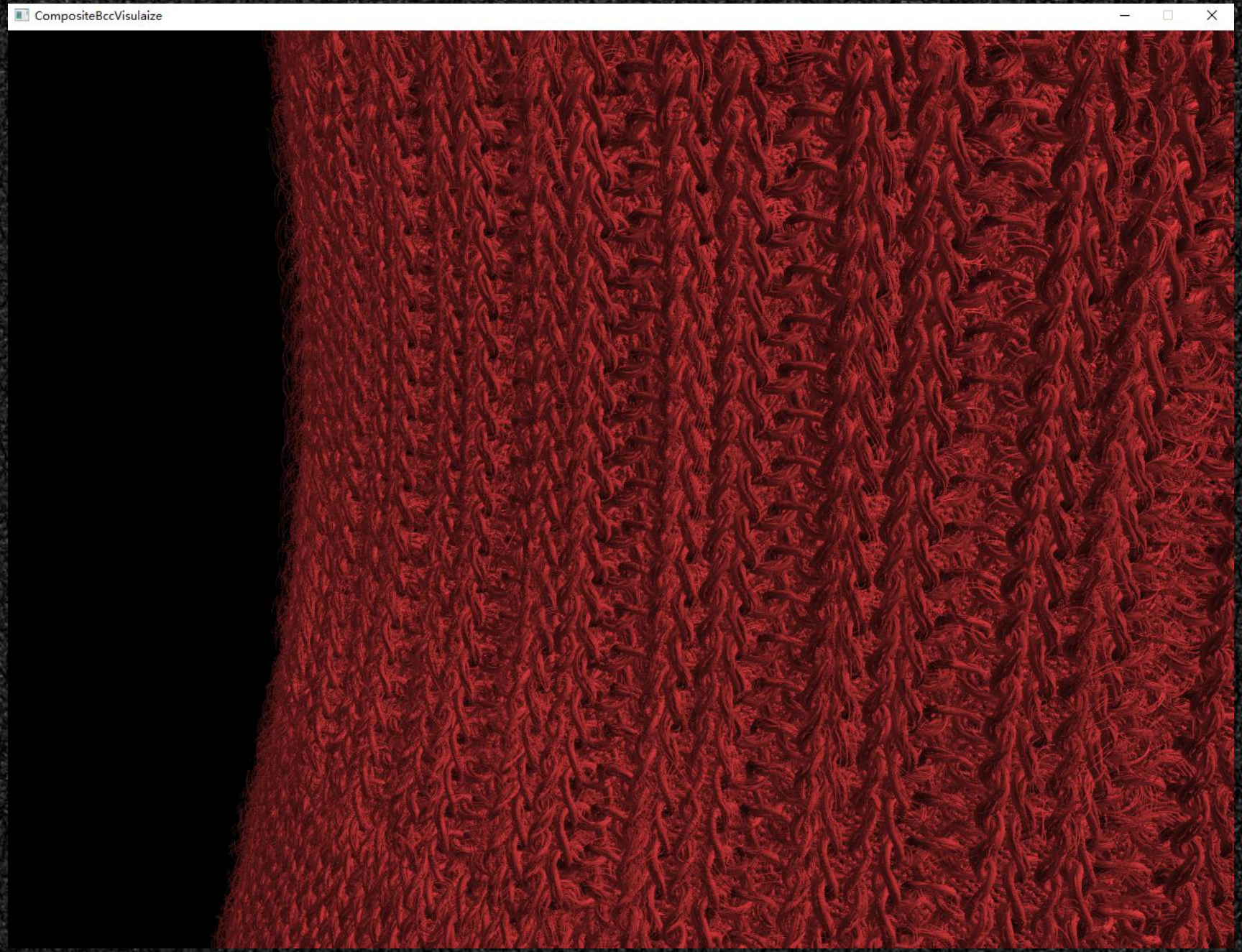
结果展示



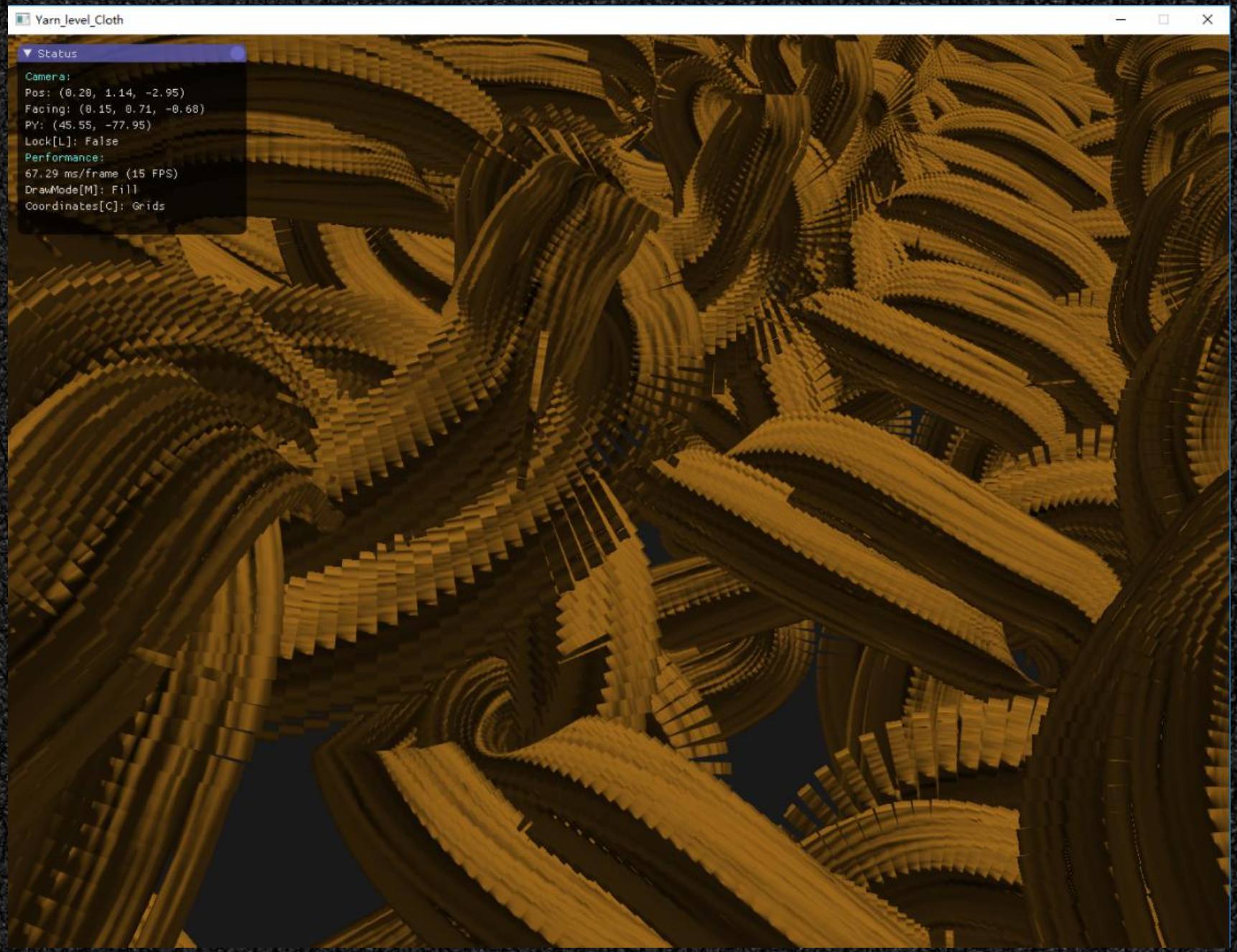
结果展示



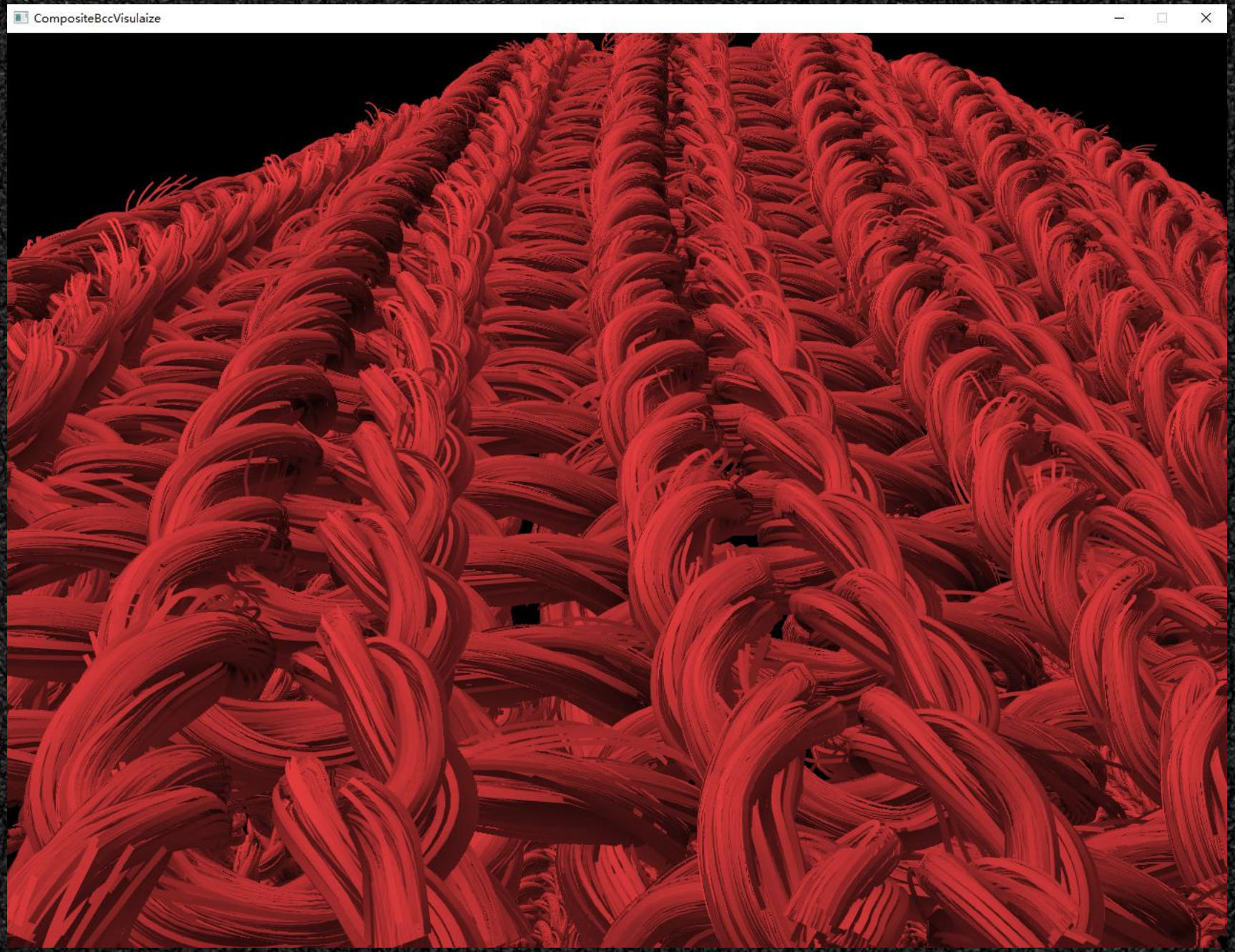
结果展示

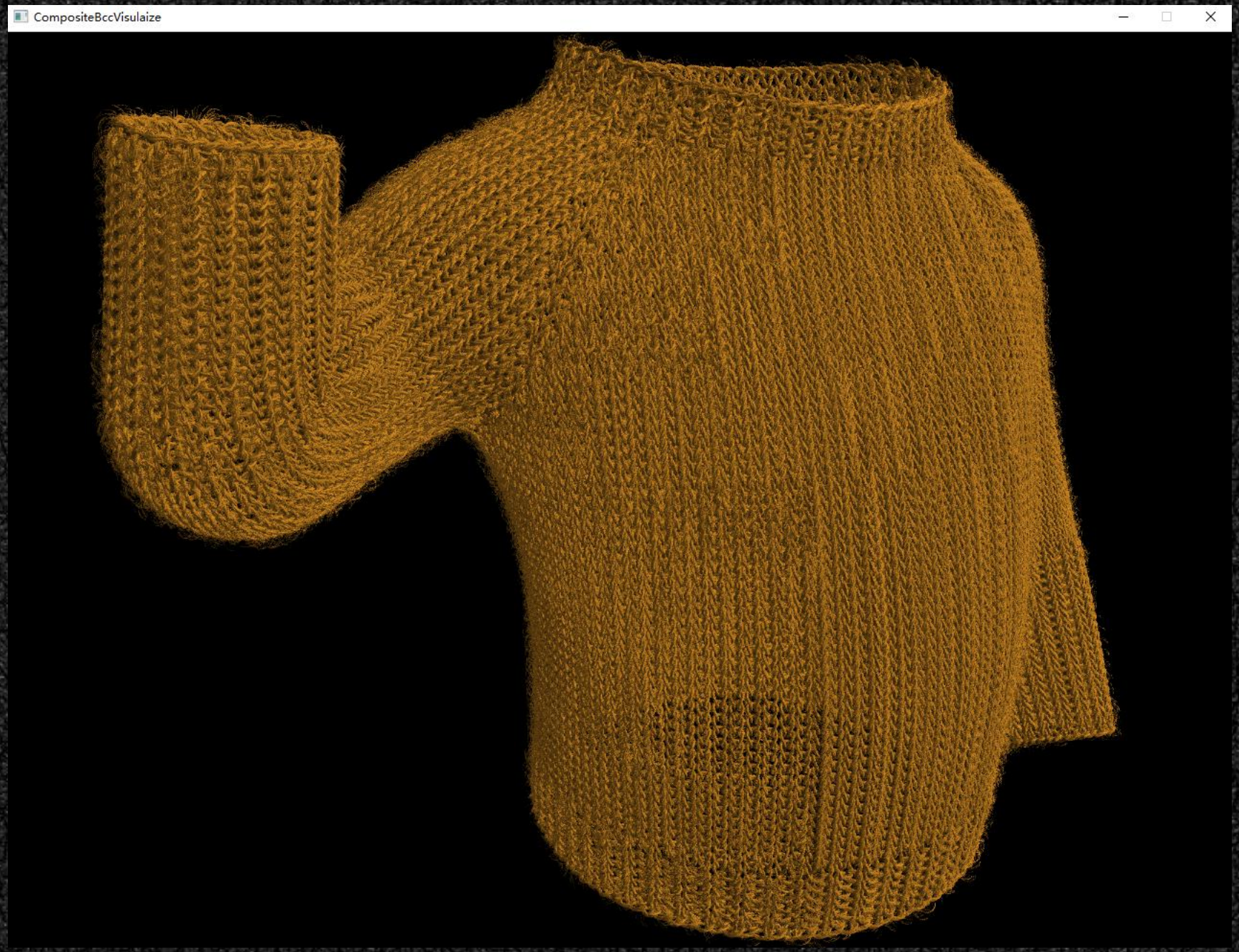


结果展示


Yarn_level_Cloth
Status
Camera:
Pos: (0.20, 1.14, -2.95)
Facing: (0.15, 0.71, -0.68)
PY: (45.55, -77.95)
Lock[L]: False
Performance:
67.29 ms/frame (15 FPS)
DrawMode[M]: Fill
Coordinates[C]: Grids

结果展示



结果展示

结果展示