

# 基于粒子系统的三维纱线模拟

史永高<sup>1</sup>, 李重<sup>1</sup>, 丁猛<sup>2</sup>

(1. 浙江理工大学 信息学院, 杭州 310018;

2. 杭州梅德尔智能科技有限公司, 杭州 310018)

**摘要:** 基于粒子系统理论与纱线的形态结构与性质, 本文给出了一种实时生成三维纱线的方法。首先使用点作为基本粒子来模拟纤维, 在此基础上以空间螺旋线几何模型建立纱线三维模型, 然后用提取出的粒子对模型进行三维填充渲染, 从而实现了纱线的真实感模拟, 最后利用三次样条插值的方法实现了纱线毛羽效果的模拟。实验结果验证该方法简单易行, 能较好的模拟出三维纱线的效果。

**关键词:** 纱线; 三维模拟; 粒子系统; 三次样条插值

**中图分类号:** TS106.4

## Three-dimensional Yarn Simulation Based On Particle System

Shi yonggao<sup>1</sup>, Lizhong<sup>1</sup>, Dingmeng<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018;

2. Meideer Intelligent Technology Company, Hangzhou 310018)

**Abstract:** In this paper, we propose a method of generating three-dimensional yarn in real time based on the particle system theory and morphological structure and properties of the yarn. Firstly, we use the points as the basic particles to simulate the fiber. And we construct 3D model of the yarn by using the helix geometric model. Then we use the extracted particles to fill and render the yarn model which can realize the realistic simulation of the yarn. Finally, we realize the hairiness simulation effect of the yarn by using the method of cubic spline interpolation. The experimental results show that this method is simple, practical and can achieve the fine effect of 3D yarn.

**Key words:** Yarn; Three-dimensional simulation ; Particle system; Cubic spline interpolation

## 0 引言

随着纺织业的迅速发展, 纺织 CAD 越来越广泛应用到生产实践中。纱线作为纺织中重要的一部分, 对其模拟就显得十分重要。目前纱线的模拟方法多种多样, 大致分为两类: 一类为二维纱线模拟的方法<sup>[1]</sup>, 如利用计算机提取纱线的参数, 依据一定的数学公式, 在计算机上作图并着色的几何结构建模法。用简单的几何图元拼凑成纱线外观的模型, 从而实现对花式纱线的模拟的图元生成法。通过扫描纱线实物, 经计算机图像处理提取特征参数, 制成纱线模板, 来对同类纱线进行模拟的模板法以及采用基于光照模型和纱线几何结构的参数化模拟法, 即用二维的方法体现三维的效果。二维纱线模拟的方法, 虽然能从形态上模拟出纱线的外观特征, 但是无论从立体感、真实感来说, 还是从仿真检测、纱线和机织物性能预测方面, 都不能很好的满足现实需要。另一类为三维模拟的方法, 一种是利用数码技术采集的实物图像对纱线的形态进行分析, 然后建立纱线的三维模型<sup>[2-3]</sup>。这种方法需要采集大量的纱线图片, 数据分析量大, 因此采用此方法建立纱线模型的研究较少。另一种是根据已知纱线的各项参数, 如纱线捻度, 细度等对纱线模型进行分析、简化, 然后运用各种数学方法建立纱线的三维模型。如用 NURBS 曲面构造纱线表面模型, 然后在其 3D 图像上添加 1D 和

**作者简介:** 史永高 (1990-), 男, 硕士研究生

**通信联系人:** 李重 (1975-), 男, 教授, 计算机图形图像、服装 CAD, 数值计算与数据分析等. E-mail: 965413651@qq.com

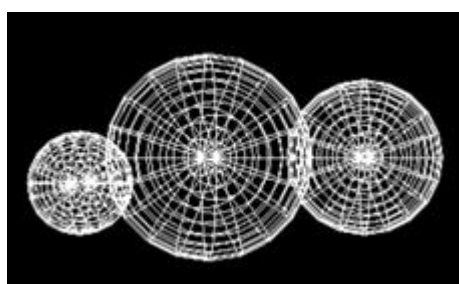
2D 纹理<sup>[4-6]</sup>。文献[7,8]采用 B 样条曲面构造具有不同截面的纱线三维模型,对纱线表面进行扰动,使之具有类似于凸包纹理的真正三维捻度效应。这种方法虽然能模拟出纱线的三维效果,但是三维模型的建立计算量大,仿真速度较低,适用范围受限。

本文在以上研究的基础上提出了一种快速构造纱线模型的方法,即利用包围盒提取具有纤维造型的粒子源,以螺旋线方程建立纱线三维模型,然后用提取出的粒子对模型进行三维填充渲染,从而实现了纱线的真实感模拟。

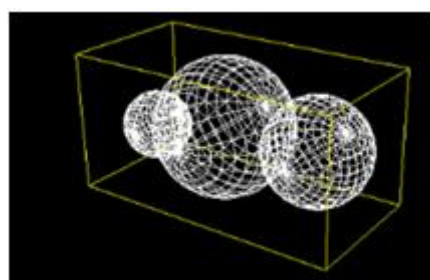
## 1 纤维的模拟

### 1.1 纤维几何模型的建模

根据纤维的结构特征,纱线的轮廓可以用球来模拟,使用多个不同大小的球可以组成不同形状的纤维。图 1(a)中显示了利用三个半径不同的球组成的纤维形状。



(a) 不同大小的球组成的纤维的形状



(b) 纤维的包围盒

图 1 纤维的球体形状表示

### 1.2 构造纤维的包围盒

整个纤维的包围盒可以用包围盒立方体对角线上的两个顶点来描述,这里使用顶点坐标全为负和全为正的两个点。包围盒结构体可以定义为

```
60 Struct BoundingBox  
{  
    VECTOR3 origin ;  
    VECTOR3 MinPt;  
    VECTOR3 MaxPt;  
65    Line Boundaries;  
};
```

在上面结构体中, *origin* 表示包围盒的中心坐标, *MinPt* 表示全为负的顶点, *MaxPt* 表示全为正的顶点。利用球心所在的位置和球的半径就可以决定包围盒的大小。用每一个球的球心位置减去该球的半径,然后比较这个值,最小的就是 *MinPt* 的值,同样用每一个球的球心位置加上该球的半径,其中最大的就是 *MaxPt* 的值。为了方便后面绘制包围盒,该结构体中还有一个 *Line* 结构体,该结构体存储着包围盒十二条边的顶点坐标的信息。绘制的包围盒如图 1(b)所示。

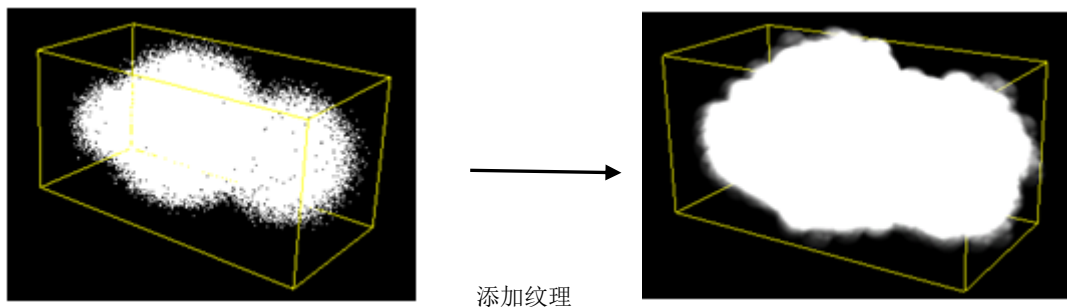
### 1.3 提取构造纤维的粒子

为了用粒子系统来模拟纤维,本文采用点作为模拟纤维的基本粒子,这需要知道每个粒子在三维空间中的位置。而这些位置就是由纤维的形状来决定的只要能找到每个球内的粒子,那么就能利用粒子来模拟纤维了。具体算法为先将包围盒分成一个一个的粒子,然后将

粒子的坐标带入球的方程（已知球心和半径），判断和半径的关系，只要小于等于半径的平方，那么该粒子就在球内。判别式为：

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 \leq R^2 \quad (1)$$

80 其中  $(a,b,c)$ 为球心， $R$  为半径。得到了纤维内部粒子，然后适当的调节粒子的大小，添加光照，给粒子贴上带 alpha 通道的纹理即可，如图 3 所示。



85 图2 粒子系统模拟的纤维

## 2 纱线的模拟

### 2.1 纱线的几何模型

所谓纱线，是由两根或两根以上的单纱合并加捻制成的股线。多股纱线加捻后，其空间几何形态为空间螺旋线。依据纱线的几何特征，采用笛卡尔坐标下的螺旋线方程建立纱线的几何模型，如下所示：

$$x = a_0 \times t \quad (2)$$

$$y = b_0 \times \sin(t \times (c_0 \times 360)) \quad (3)$$

$$z = b_0 \times \cos(t \times (c_0 \times 360)) \quad (4)$$

95 式（2）-（4）中： $a_0$ 和 $b_0$ 控制纱线的直径和粗细， $c_0$ 控制纱线的捻回数， $t$ 调节参数。模拟纱线的主要参数由用户自己控制调节。

### 2.2 纱线模拟实现

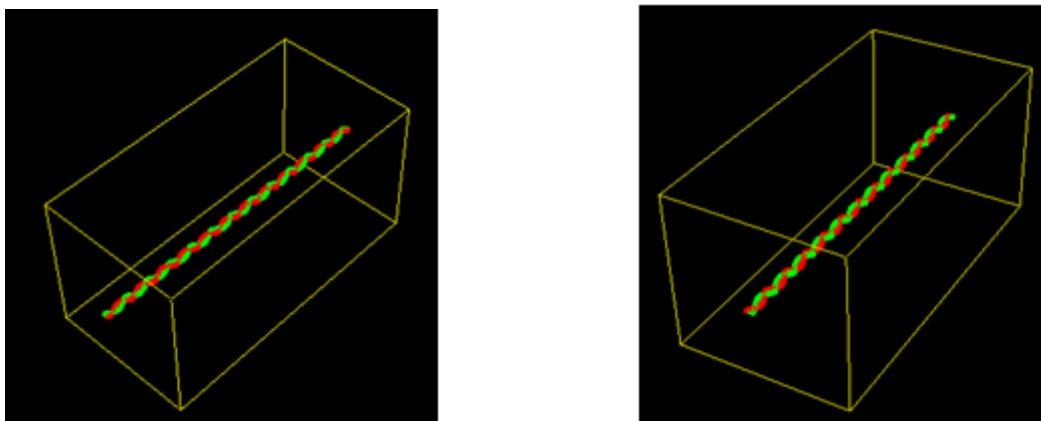
依据模拟纤维提取出的粒子结合纱线的几何模型，提出一种快速模拟纱线的算法，主要步骤如下：

100 Step1.根据模拟纤维时提取出的粒子，已知每个粒子在三维空间中坐标  $(x,y,z)$  ,把所有粒子均分为两份，分别模拟两股单纱。

Step2.依据纱线的几何模型，由每个粒子在三维空间中的  $x$  坐标，求出  $y$  坐标和  $z$  坐标，然后遍历所有粒子，重新分配所有粒子的位置。

105 Step3.在分配好粒子位置后，对所有粒子的  $y$  轴坐标和  $z$  轴坐标方向上利用随机函数  $\text{rand}()$ 使其随机分布,从而实现纱线三维效果。

纱线的捻向分为顺时针的拧紧的 S 捻和逆时针拧紧的 Z 捻，多数情况下，单纱采用 Z 捻；股线采用 S 捻，互为反向，纤维排列方向与股线轴平行，这样股线柔软、光泽好，捻向和结构稳定。为了区分方便，分别采用红色和绿色代表两股单纱。实现的效果如图 3 所示。



110

图3 粒子系统模拟的纱线

### 2.3 花式纱线模拟

花式纱线<sup>[9]</sup>根据其结构形态和色彩特征,可分为花式纱线和花色纱线两大类。利用不同成纱原理和加工工艺使纱线内部结构和外观形态变化而获得花式效应的纱线,称为花式纱线。如结子纱、竹节纱、雪尼尔纱等。利用不同色彩光泽的纤维或染色方法使纱线色彩变化而获得花色效应的纱线,称为花色纱线。如印花纱,段染花色纱等。

本文分别以结子纱和段染花色纱为例,来模拟花式纱线和花色纱线。结子纱是由芯线和股线被做出的速度不同,产生结状,从而形成结子纱。生成结子的算法是,首先从  $x$  轴截取纱线的一部分粒子,对这部分粒子位置进行重新分配,用这段纱线的起点与终点的距离的四分之一作为分配到空间  $yoz$  平面圆形的最大半径,然后对这段纱线的每个粒子需要分配到空间  $yoz$  平面圆形的半径,用其这段纱线中心与起点的距离减去当前粒子与这段纱线中心的距离来确定,最后遍历这段纱线所有的粒子,在  $y$  轴与  $z$  轴添加随机函数,重新确定每个粒子的位置,由此生成结子。段染花色纱是花色纱线的一种,其特征主要体现在颜色变化上,本文采用  $RGB$  颜色模型来实现纱线颜色的渐变。纱线两边分别设置两种不同颜色  $RGB$  分量最大值,中间过渡色用线性插值的方法实现。具体步骤是,首先确定两种过渡的颜色,假设两种颜色为  $color1, color2, color1$  颜色分量的值为  $R_1, G_1, B_1, color2$  三个颜色分量的值为  $R_2, G_2, B_2$ 。则  $color1$  颜色向  $color2$  颜色过渡的表达式如下:

120

125

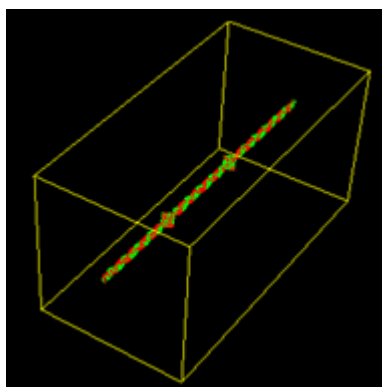
$$R = R_1 \pm \frac{MD}{Length}, \quad R \text{ 在 } R_1 \text{ 和 } R_2 \text{ 之间} \quad (5)$$

$$G = G_1 \pm \frac{MD}{Length}, \quad G \text{ 在 } G_1 \text{ 和 } G_2 \text{ 之间} \quad (6)$$

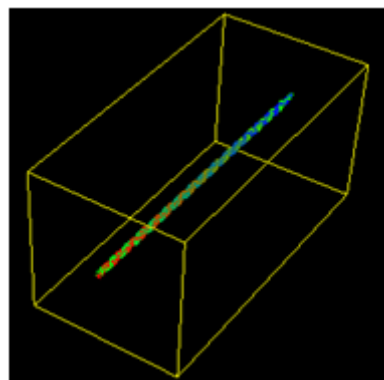
130

$$B = B_1 \pm \frac{MD}{Length}, \quad B \text{ 在 } B_1 \text{ 和 } B_2 \text{ 之间} \quad (7)$$

式(5) - (7)中  $Length$  为段染纱线的长度,  $MD$  为  $color1$  与  $color2$  三个颜色分量距离的最大值,  $R, G, B$  是  $color1$  向  $color2$  过渡的颜色分量。花式纱线的模拟效果如图4所示。



(a)粒子系统模拟的结子纱



(b)粒子系统模拟的段染花色纱

图4 花式纱线

135

### 3 纱线毛羽效果模拟

经过上述过程模拟的纱线，虽然体现出了纱线的三维特征效果，但由于构成纱线纤维材质的不同，纱线表面会产生各种程度的毛羽，为了使三维纱线模拟效果更加真实、逼真，依据所选的模拟纱线的材质，模拟出相应的毛羽效果。本文运用三次样条插值的方法实现三维纱线的毛羽效果。

140

#### 3.1 三次样条插值

插值法作为数值分析理论重要的一部分，被广泛应用到计算机辅助几何设计中。它包括拉格朗日插值、牛顿插值、埃尔米特插值、分段插值、样条插值等<sup>[10-13]</sup>。本文采用三次样条插值<sup>[14-15]</sup>的方法来模拟纱线的毛羽。给定区间 $[a,b]$ 的一个划分

145

$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ , 如果函数  $S(x)$  满足:

- (1) 在每个小区间上是三次多项式;
- (2) 在每个内节点上具有二阶连续导数;
- (3)  $S(x_i) = y_i$ ;

则称  $S(x)$  是  $f(x)$  在该区间上关于该划分的一个三次样条函数。三次样条插值函数  $S(x)$  是一个分段三次多项式，要求出  $S(x)$ ，在每个小区间  $[x_i, x_{i+1}]$  上要确定四个待定参数，若用  $S_i(x)$  表示它在第  $i$  个子区间  $[x_i, x_{i+1}]$  上的表达式，则

150

$$S_i(x) = a_{i0} + a_{i1}x + a_{i2}x^2 + a_{i3}x^3, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (8)$$

其中四个待定系数为  $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}$ ，子区间共有  $n$  个，所以要确定  $S(x)$  需要  $4n$  个待定系数。本文在已知插值点坐标和自然边界条件  $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$  情况下，采用三转角法

155

求出三次样条插值函数  $S(x)$ ，从而实现纱线毛羽效果模拟。

#### 3.2 纱线毛羽效果实现

在上述完成三维纱线建模的基础上，运用分段三次样条插值的方法实现纱线毛羽效果。具体算法步骤为:

Step1 将纱线按照其中轴线划分成若干等分区间。

160

Step2 在每个等分区间的纱线上确定一个粒子，在其周围添加三个随机粒子，这些粒子将作为每个区间三次样条插值的已知点，各个区间内的已知点如图 5(a)所示。

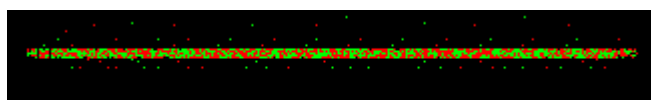
Step3 用每个区间已知的四个点和自然边界条件,运用三转角法确定每个区间的三次插值样条函数,然后用 OpenGL 画图函数拟合出每个区间的曲线,拟合的曲线如图 5(b)所示。

Step4 重复进行多次 Step2 操作, , 增加足够多的点, 如图 5(c)所示。

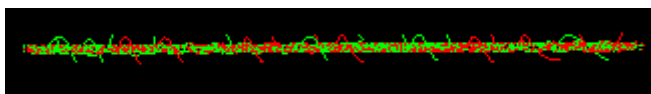
165 Step5 重复 Step3 操作, 依据其已知条件绘制出数量足够多的曲线, 从而实现纱线毛羽效果, 如图 5(d)所示。

Step6 在 Step5 模拟出纱线毛羽效果的基础上, 加上结子, 从而模拟出带毛羽的结子纱, 如图 5(e)所示。

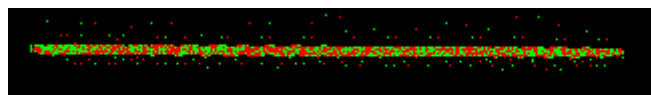
170



(a)各个区间内的点

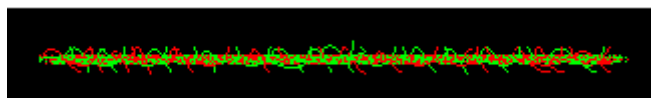


(b)拟合出的曲线

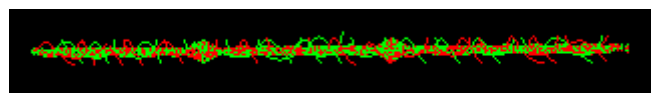


(c)各个区间内增加点

175



(d)拟合出的多条曲线



(e)带毛羽的结子纱

180

图 5 纱线的毛羽效果

## 4 结论

本文所有的三维效果图使用 VC++2010 与 OpenGL 函数库实现,可以在个人 PC 机上快速构造纱线以及十分方便的实现平台间的移植。在计算机图形学中,粒子系统越来越应用到更多的模型构造中,其方法在速度、真实感以及动画效果上具有不可替代的作用。本文成功的运用粒子系统模拟出纱线及其成纱加捻过程,但是花式纱线种类繁多,如何依据粒子系统模拟出各种花式纱线以及光照和纹理对其影响将是以后主要研究方向之一。

185

### [参考文献] (References)

- [1] 沈宇, 叶青青, 张瑞云. 纱线与织物实物模拟技术初探[J]. 现代棉纺织技术[J], 2008, 1(5): 44-56.
- [2] ADANUR S, EI Mogahzy Y, Hady F. Yarn and fabric design and analysis system in 3D virtual reality [J].National Textile Center Annual Report,2001,100(A06): 1-5.
- [3] OZDEMIR H, BASER G. Computer simulation of woven structures based on actual yarn photographs [J].Computational Textile,2007,55(1): 75-91.
- [4] CHEN Y Y,LIN S H, ZHONG H, et al. Realistic Rendering and Animation of Knitwear[J].IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphica, 2003, 9(1): 43-55.
- [5] WANG Y Q, SUN X K. Digital-element simulation of textile processes [J]. Composites Science and Technology, 2001, 1(61): 311-319.
- [6] 王东峰, 郑天勇, 崔世忠, 等. 三维单纱的计算机模拟[J]. 棉纺织技术, 2006, 34 (6): 29-31.
- [7] 郑天勇, 崔世忠. 用 B 样条曲面构建纱线三维模型的研究( I ):具有不同截面的三维纱线模型的构造[J]. 纺织学报, 2006, 27(2): 53-57.
- [8] 郑天勇, 崔世忠. 用 B 样条曲面构建纱线三维模型的研究( II ):纱线捻度的三维模拟[J]. 纺织学报, 2006,

200

27(3): 24-26.

[9] 张瑞云, 李汝勤. 花式纱线嵌于织物中效果的计算机模拟[J]. 纺织学报, 2000, 21(5): 298-300.

[10] Barry P J. De Boor-Fix Dual Functionals and Algorithms for Tchebychevian B-splines Curves[J]. Constr. Approx, 1996, 12(1): 385-408.

205 [11] Hollig K, Koch J. Geometric Hermite interpolation[J]. Computer Aided Geometric Design, 1995, 12(6): 567-580.

[12] Hollig U, Koch J. Geometric Hermite interpolation with maximal order and smoothness[J]. Computer Aided Geometric Design, 1996, 13(8): 681-695.

210 [13] Degen W L F. Geometric Hermite interpolation-In memoriam Josef Hoschek[J]. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22(7): 573-592.

[14] Habib Z, Sarfraz M, Sakai M. Rational cubic spline interpolation with shape control[J]. Computers&Graphics, 2005, 29(4): 594-605.

[15] Ren B, Liu H J, Yang L. Smooth support vector regression based on modification spline interpolation[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, 44(1): 92-100.

215