

基于自相似的风格化线条纹理合成方法

蒋宝吉, 唐 棣

(辽宁师范大学 计算机与信息技术学院, 辽宁 大连 116081)

摘要: 针对动画风格化线条渲染中需要权衡线条纹理滑动和线条纹理缩放两种不同的走样现象, 提出了一种新的线条纹理(自相似样图), 从而避免了这两种走样现象。自相似样图的纹理可以连续地无限放大, 并且可以从单一样本自动生成。自相似样图可替代传统笔画纹理用于 2D 插图和动画。此外, 自相似样图应用新的简单的方法, 可以连贯地渲染 3D 路径, 适用于交互式应用程序。

关键词: 非真实感绘制; 线条绘制; 自相似; 样图纹理

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)15-0041-04

Texture synthesis method of stylized lines based on self-similar

Jiang Baoji, Tang Di

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China)

Abstract: Stylized line rendering for animation has traditionally traded-off between two undesirable artifacts of stroke texture sliding and stroke texture stretching. This paper proposes a new stroke texture representation, the self-similar line artmap, which avoids both these artifacts. The self-similar line artmap textures provide continuous, infinite zoom while maintaining approximately constant appearance in screenspace, and can be produced automatically from a single exemplar. The self-similar line artmaps can be used as drop-in replacements for conventional stroke textures in 2D illustration and animation. Furthermore, the self-similar line artmaps enable a new, simple approach to temporally coherent rendering of 3D paths, so that is suitable for interactive applications.

Key words: non-photorealistic rendering; line drawing; self-similar; artmap

风格化线条在线条渲染中是不可缺少的一部分。一条虚线可以暗示一种无形的对象, 而草图轮廓可以表示强调或运动。通过计算机模拟这些效果的一个常用方法是: 定义一个参数化的空间曲线(笔刷路径), 并沿其长度进行渲染纹理。采用的纹理包括点、短划线、钢笔或铅笔标记的图像。线条纹理可以创造有吸引力的景象。

KLEIN A W^[1]等人提出的线条纹理笔刷路径的样图方法采用了 N 个纹理(一个样图), 其中每个纹理有一个特定的目标。在每一帧选择并绘制目标长度与前路径长度最接近的纹理。本文提出了一种基于样图的方法, 称为自相似样图。一个自相似样图类似于传统的样图, 但它有两个特性: 自相似性和平滑性。自相似性意味着在两个不同层次的样图重复相似纹理, 在没有任何干扰下无限放大。平滑性意味着在样图附近水平外观上相似, 并确保动画的连贯性。

本文运用自相似样图对模型进行线条渲染。首先,

应用基于样本合成方法创建一个满足自相似样图条件的任意密度集纹理; 然后, 运用自相似样图渲染参数化视点相关的 3D 线条。

1 自相似样图

传统样图方法所需的纹理数量级为 $O(\log L_{\max})$, 其中 L_{\max} 为最长的路径, σ 为允许的最大缩放因子。自相似样图是自相似的, 允许少数纹理渲染一个任意长度的纹理路径。本文提出的基于样本的样图合成方法可生成一个基于单一样本的任意密集的样图, 保证了在每个样图水平下无缝融入。首先使用 1D 纹理描述实施。

1.1 自相似样图的定义

线条样图可视化为一个金字塔, 最底层宽度为 L_{\max} , 每一级别的长度随着 σ 不断缩小。为方便起见, 定义样图为一个函数 $A(u_1, u_2, l)$, 其中 u_1 和 u_2 为左右的纹理坐标, l 是样图级别。令 $l=1$, 样图对应的纹理长度为 L_{\max} 。例如, $A(0, 1, 0.5)$ 对应于整个纹理目标长度为

$0.5L_{\max}$, $A(0.5, 1.0, 0.2)$ 对应的纹理的右边目标长度为 $0.2L_{\max}$ 。为了简便, 令 $A_1 = (0, 1, l)$ 。

为了支持任意长度的路径无限放大, 整个样图域 $u_1 \in R, u_2 \in R, l \in R^+$ 必须映射到一个有限的纹理, 如图 1 所示。其中, $A(u_1, u_2, l)$ 是阴影区域一部分, $l < 0.5$ 或 $l > 1.0$ 的线条 (虚线) 通过映射函数 g 映射到 $0.5 < l < 1.0$ (实线)。为了适应任意 u_1 和 u_2 , 每一个样图的纹理同本身无缝地平铺, 但这会出现 $l > 1$ 。这样样图就需要一个约束条件: 自相似。就是说, 必须存在至少一对纹理 A_x 和 A_y , 使 $A_x = [A_y A_y]$ (A_y 与本身的连接)。如果存在这样一对纹理, 那么循环两个相似纹理就可以处理任意伸展或收缩。图 2 显示了一个虚线样图的例子。底部的纹理在视觉上相当于一个顶部纹理的平铺版本。为方便起见, 令 $x=1.0, y=0.5$ 。从全域到自相似域映射, 然后定义一个映射函数 $g(u_1, u_2, l) \in R^3$:

$$g(u_1, u_2, l) = (2u_1, 2u_2, 2^{-l}) \quad (1)$$

其中, $t = \lceil \log_2 l \rceil$ 。

如果渲染的路径为 s , 纹理采用 $A(g(0, 1, \kappa s / L_{\max}))$, 其中 κ 是一个用户定义的缩放参数。

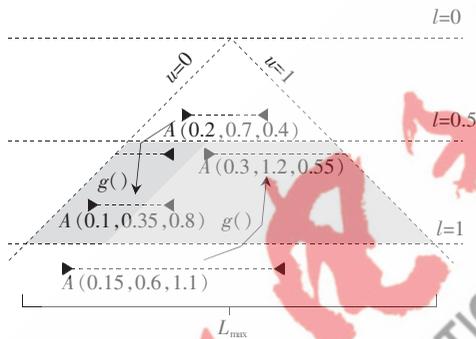


图 1 自相似样图的参数空间

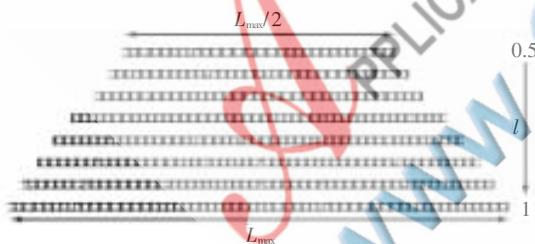


图 2 一条虚线纹理的自相似样图

1.2 自相似样图的合成

本文的方法是基于 PORTILLA J 和 SIMONCELLI E [2] 的参数化纹理合成方法 (PTS)。每个样图纹理 A_1 的 PTS 结果采用一个过滤白噪声种子 W_1 。PTS 方法具有一个重要的特点, 即输入种子有微小变化, 则输出结果就会有微小变化。利用这个特点, 构建一套种子 W_1 , 满足自相似性和平滑变化的自相似样图条件。由于 PTS 的连续属性, 如果 W_1 满足自相似样图的条件, 那么 A_1 也应该满足条件。种子 W_1 是白噪声纹理 W_{source} 缩放和过滤的一个版本, 长度为 L_{\max} 。只需要确保 W_1 满足自相似性和平滑

变化的条件, 并统计白噪声。在实施中, 开始从一个过滤版本 W_{source} 缩放和线性插值产生每个 W_l , 如图 3 所示。

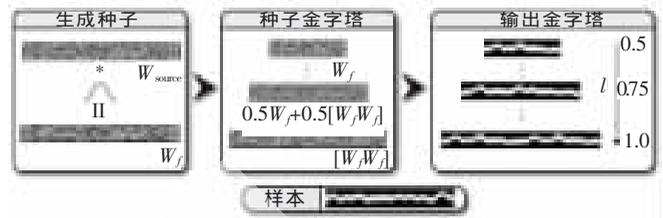


图 3 自相似线条图的合成

白噪声纹理 W_{source} 用高斯滤波器过滤 (5 像素) 产生一个平滑的版本 W_f 。然后调整平滑种子 W_f , 用直方图匹配均匀分布在 $(0, 1)$ 范围。种子金字塔顶层 $W_{0.5}$ 是将 W_f 简单缩放到其原始长度的一半。金字塔的底层 $W_{1.0} = [W_{0.5} W_{0.5}]$ 。金字塔的内部水平缩放 $W_{0.5}$ 和 $W_{1.0}$ 生成适当的长度, 然后线性插值:

$$W_l = \alpha W_{1.0} + (1 - \alpha) W_{0.5} \quad (2)$$

其中, $\alpha = 2l - 1$

种子金字塔的创建满足自相似性的条件, 因为 $W_{1.0}$ 是一个平铺的 $W_{0.5}$ 版本。金字塔的顶部和底部的线性插值满足平滑变化状况。

本文所有结果均由 8 个和 32 个像素宽度的纹理生成。而本文的描述仅仅考虑 1D 纹理, 合成算法需要一些必要的修改去适应 2D 纹理。

种子金字塔的创建与 1D 情况类似。 W_{source} 变成一个 $d \times L_{\max}$ 白噪声的纹理, d 是行数。因为在一维 W_f 仅仅被缩放, 所以从 W_{source} 到 W_f 的初始过滤操作只有 1D (在图 3 的水平方向)。其余操作 (即生成种子金字塔) 与 1D 的情况相同。最大的变化是在纹理合成上, 2D 笔画纹理不符合 PTS 方法的平稳假设。一个 2D 的纹理每一行的数据是不同的: 顶部和底部通常是暗的 (透明), 而中间通常是明亮的。本文的做法是运用不同的数据到纹理的每一行, 同时采用 PTS 方法存储和应用源纹理的不同数据。通过实验发现, 仅仅改变按行均值和方差就可以产生良好的效果。

2 连贯线条参数化

将自相似线条样图应用到复杂弯曲的路径需要定义一个参数 T 。最简单的选择是定义 T 为路径 s 在屏幕空间的弧长。然而, 对于任何视点相关特征线 (剪影、轮廓、山脊等), 这种方法会产生“游泳”的伪像, 从一帧到下一帧不能确保时间相干性。为了解决这个问题, 本文提出一个屏幕空间参数化方法, 其中发现参数 (ρ, φ) , (如 $T(s) = \rho s + \varphi$) 最适合前一帧参数化。首先使用抛雪球算法传递 f 帧到 $f+1$ 帧的参数, 然后更新参数, 并结合自相似样图渲染线条。图 4 给出了整个过程。

2.1 传递参数

第一步是传递 f 帧到 $f+1$ 帧的所有路径参数。在 f 帧, 用户定义的采样率为 δ , 在屏幕空间对每个可见的

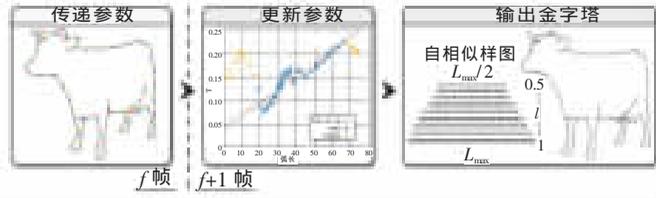


图4 连贯线条参数化过程

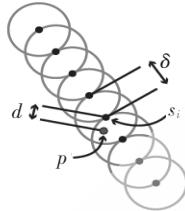
路径均匀取样。每个采样用弧长 s_i 和路径的当前参数 (ρ, φ) 参数化。

观测视点相关线在屏幕空间中连续平滑地移动,该方法的核心思想是延伸每个样本的大小,输入其相应的参数到屏幕空间缓冲区(参数化缓冲区),在 $f+1$ 帧查找视点相关线与 f 帧最相近的。

样本参数 $t_i = \rho s_i + \varphi$ 为一个半径为 δ 的缓冲区,如图5所示。从中心 s_i 到 p 的距离 d 确定抛雪球算法参数化 t_i 的权值:

$$w_i = \text{clamp}\left(1 - \frac{d}{\delta}, 0, 1\right) \quad (3)$$

通过抛雪球算法 w_i 记录权值。

图5 半径为 δ 的缓冲区

在此步骤结束时,由包含 $(\sum_j w_j t_j, \sum_j w_j)$ 的 j 个重叠样本覆盖缓冲区的每个像素。如果没有路径重叠,这一权重方法相当于沿着线条参数化的线性插值。根据 COLE F 和 FINKELSTEIN A^[3] 的样本局部可见性或样本在这一点上的深度 z 可以改变权值。

与参考文献[4]算法不同,本文的方法不依赖于项目缓冲区。项目缓冲区的方法会引入锯齿假象,需要对每一个样本的局部邻域搜索,本文的抛雪球算法避免了这种搜索。

2.2 更新参数

在 $f+1$ 帧,从 f 帧采样新的可见笔刷路径,每个样本重投影到前一帧的参数缓冲区。如果这个像素位置 $\sum_j w_j$ 被定义,则记录票数:

$$v_k = \left(\frac{\sum_j w_j t_j}{\sum_j w_j}, s_k \right) \quad (4)$$

这一对值可以把 f 帧 j 位置的平均参数与样本的当前弧长参数 s_k 联系起来。

对于每一条路径,计算的缩放系数 ρ 和相位 φ 是最适合在最小二乘检测上的票数。路径重叠时输入的票数可以有噪声,本文使用 RANSAC 算法^[5]估计这两个参数。这种迭代法权衡了速度和精确度;用户估计外部票数的比例和内部票数的目标概率,控制所需的迭代次数。如果已记录的路径少于两票,则用 $T(s) = s/L$ 参数化路径,其中 L 是路径的长度, T 的范围是 $[0, 1]$, 使用默认参数

初始化渲染第一帧。

2.3 线条渲染

在最后阶段,使用路径参数确定适当的自相似样图级 l 渲染最终的纹理线条。为了防止路径移出屏幕而保持在自相似样图同一水平,定义缩放系数为 ρ 的函数 l 。不同长度的路径,路径裁剪时 ρ 不改变。考虑自相似样图的自相似性,计算公式为:

$$d = \rho k L_{\max} \quad (5)$$

$$l = \begin{cases} w/d, d > 2 \\ 1/d, d \in [1, 2] \\ 1/(d\Omega), d < 1 \end{cases} \in [0.5, 1] \quad (6)$$

$$w = 2^{\lfloor \log_2(1/d) \rfloor}, \Omega = \lfloor 2/d \rfloor \quad (7)$$

其中, L_{\max} 为自相似样图最长的纹理长度, κ 是一个用户定义的缩放因子。当样图金字塔从一端到另一端循环时,路径参数化 T 分别缩小 $1/w$ 和 Ω 。

自相似样图能够在 GPU 上使用三线性过滤,可以简单地表示 3D 纹理,根据路径参数和自相似样图的级别 $(w=2l-1)$ 分配 3D 纹理坐标到每个片段。

3 结果分析

纹理合成结果如图6所示。对于简单的纹理和样本,合成结果几乎没有区别;对于如涂鸦和错杂的线条(图5底部)等更复杂的纹理,合成结果的整体印象是相似的,但合成结果的一些细节丢失。自相似样图是由 17 个 1024 像素 \times 32 像素的灰度图像组成的,合成通常需要几分钟,本文用 Matlab 来实现。

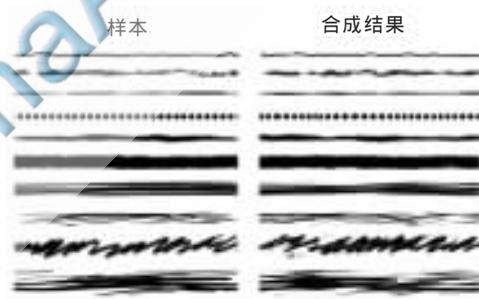


图6 纹理合成结果

本文使用参考文献[3]的方法来计算路径的可见性,并在 GPU 上执行线条的最终渲染。本文的方法可用于任何系统的纹理渲染线条,如 Mcguire 和 Hughes^[6]。本文方法的瓶颈是 RANSAC 算法,在性能上可见部分和离群点的数量取决于参数的变化。这种算法在本质上是类似的,因为每个路径参数可以独立适合。本文在 CPU 使用 OpenMP 加快这一步。

自相似样图解决了风格化渲染中如何产生好的动画线条纹理(如点、涂鸦、或笔刷痕迹)的问题。虽然自相似样图是一个传统样图的特殊情况,但是,应用自相似性和平滑性的附加条件到二维动画和流畅的 3D 模型渲染上,增强了自相似样图纹理的实用性。

本文的纹理合成方法可以创建任意密度的自相似样图,并产生了良好效果的一系列纹理类型。图7给出

了应用不同的样式实现多种自相似样图从三维模型中提取的线条，最下边一行是自相似样图里的一条纹理。创建新的样式只需要合成新自相似样图即可。

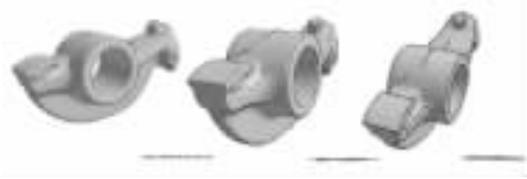


图7 应用自相似样图对三维模型的渲染结果

参考文献

- [1] KLEIN A W, LI W W, KAZHDAN M M. et al. Nonphotorealistic virtual environments [J]. ACM Transactions on Graphics, 2000:527-534.
- [2] PORTILLA J, SIMONCELLI E P. A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients [J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(1):49-70.
- [3] COLE F, FINKELSTEIN A. Two fast methods for high-quality line visibility [C]. IEEE Transactions on Visualization

and Computer Graphics, 2010.

- [4] KALNINS R D, DAVIDSON P L, MARKOSIAN L, et al. Coherent stylized silhouettes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3):856-861.
- [5] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.
- [6] MCGUIER M, HUGHES J F. Hardware-determined feature edges [C]. In NPAR 2004: International Symposium on Nonphotorealistic Animation and Rendering, ACM, 2004: 35-47.

(收稿日期:2013-04-16)

作者简介:

唐棣,女,1960年生,教授,主要研究方向:计算机图形学。