

自然纹理的过程生成及其动画

苏成¹ 马向英¹ 李华¹ 刘慎权¹ 李冬果²

¹(中国科学院计算技术研究所 CAD 开放实验室 北京 100080)

²(首都医科大学 北京 100054)

摘要 给出了一种自然纹理的图象生成方法——过程生成方法。采用应用随机过程中的马尔可夫序列理论,解决了计算机动画和机器人学中路线规划的静态故障避免问题,生成了行走路线,并由此形成了室内地面纹理及磨损过程动画。这种方法具有高度的真实感,善于表现纹理的连续性和演变趋势。

关键词 计算机动画,自然纹理,过程生成,随机行走,马尔可夫序列。

中图分类号 TP391

在我们研究计算机动画及虚拟现实方面的一些问题时,认识到纹理技术,如纹理分析、纹理合成,特别是自然纹理生成技术的巨大实用价值。本文给出了一种新的自然纹理的图象生成方法——过程生成方法。首先介绍与纹理有关的一些主要说法。

(1) 颜色纹理和几何纹理。按照计算机图形学的一般理论^[1],纹理一般指物体的表面细节,可分为颜色纹理和几何纹理两种,颜色纹理取决于物体表面的光学属性,几何纹理和物体表面的微观几何形状有关。

(2) 自然纹理(Natural Texture)^[2]和人工纹理(Artificial Texturing)^[3]。在1980年,纹理还被笼统地称为数字图象纹理(Digital Image Texture)^[4]。1983年,Schweizer把模板应用于曲面以表示纹理梯度信息,称为人工纹理,其目的不是为了产生真实感,而是为了有助于生成曲面的可视化。1996年,徐迎庆^[5]比较全面地总结了自然纹理的生成方法,指出“在许多情况下,人们都把自然纹理看作是在某个指定区域中局部模式的重复或按照某种规律的自相似嵌拼”。

(3) 表面纹理(二维)、实体纹理(三维)及体纹理。“表面纹理可以采用纹理映射的方法进行模拟...实体纹理技术将纹理直接定义在三维空间中”。^[5]二维纹理见于文献[6],实体纹理见于文献[7],而且文献[5,7]中的实体纹理就是文献[1]中的体纹理。

(4) Stochastic 纹理^[8]和随机模板(Random Pattern)^[9]。文献[8]指出 Stochastic 纹理出现于1983年:“Stochastic 纹理定义为一种表面上的折射或反射模式,其密度和法向量表示为随机函数”,其背景与1982年的 Stochastic 模型有关。^[10]文献[3]指出,Stochastic 纹理即自然纹理。随机模板^[9]也是一种较早出现的自然纹理。

“现代计算机动画(研究)的目标之一是复杂自然环境的模拟”^[2,4],而纹理技术则是重要手段之一。在我们研究基于图象的生成技术时,为模拟复杂的自然环境,要求前后两帧的纹理之间既有差别,又具有相对连续性,从长时间看具有演变的趋势,并避免出现闪烁的效果,现有的采用贴图的方法或模型驱动的方法^[11]无法满足这种要求,需要采用新的自然纹理生成技术。1978年,Yokoyama给出了采用生长模型的方法^[12],在 SIGGRAPH'93 的讨论组^[13]中,Karl Sims 讨论过图象和纹理的过程生成问题(Procedurally Generated Pictures and Textures),并在文献[14]中给出了纹理的过程生成的遗传算法,其共同特点是生成的纹理是关于时间的函数,依赖于特定的生长模型。本文的方法也具有特点,故称为过程生成方法。但本文提出的方法进一步结合了计算机动画中的路线规划技术和贴图技术,以计算量为代价,具有真实感强、连续性和演变趋势等优点,是一种真正模拟了纹理生成过程的方法,这只有在软硬件技术发展到今天才能实现,检索中还比较少见。

• 本文研究得到国家自然科学基金资助。作者苏成,1970年生,博士生,主要研究领域为计算机图形学,计算机动画,计算机视觉, CAGD。马向英,1974年生,硕士生,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实。李华,1957年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学。刘慎权,1930年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为 CAD,计算机图形学,科学可视化。李冬果,女,1970年生,助教,主要研究领域为计算机图形学,计算机动画,医学图象处理,多媒体技术。

本文通讯联系人:马向英,北京 100080,中科院计算所 CAD 开放实验室

本文 1998-02-28 收到原稿,1998-04-20 收到修改稿

为真实地模拟室内地面纹理的生成过程,我们的想法是,让成百上千的人在室内进出、走动,形成大量的脚印造成地面磨损,并最终形成了地面纹理。在第1节中,我们设计了随机行走路线发生器,认为随机行走路线构成一个马尔可夫序列^[4,8,15,16],解决了路线规划的静态故障避免问题^[17],生成了随机行走路线。第2节处理脚印。第3节实现了上述算法,并用计算机动画技术生成了地面磨损过程的动画。

1 随机行走路线发生器

1.1 路线规划中的静态故障避免问题

在计算机动画中有相当多的工作研究人体行走模型,如研究人体的建模;关节结构;运动控制;行走的动作、速度、前进后退等。N. M. Thalmann 和 D. Thalmann^[17]认为,动画系统应该为依赖于环境的动作者确定可能的路线。本文的问题应该对应地属于静态故障避免问题。文献^[17]指出,路线规划是经典问题,在人工智能和机器人学方面对这一问题有广泛研究。文献^[17]还总结了现有的主要方法,如,使用费用函数避免故障的方法;以视力为基础的方法;利用参数模型施加和解决几何约束的方法,把约束表达为能量函数,并用能量梯度变化曲线通过模型的参数空间表现出来等等。

为了更真实地模拟人的随机行走路线(包括每一步的位置和方向),我们考虑了很多方法,如采用变形动画的方法设计位于矩形边界与中心之间的曲线;采用B样条或其他磨光曲线逼近矩形边界来计算路线;采用与数学机械化方法,处理连杆传动问题相似的方法;采用费用函数的方法等。经比较,选用了根据正态马尔可夫序列理论设计的随机行走路线方法。这是由于脚印的下一步位置只与当前位置有关,与以前位置无关,即无后效性,因此,可认为,脚印当前的位置和方向序列构成马尔可夫序列。

1.2 随机行走路线的建立

随机行走路线既具有随机性,又具有确定性。随机性来自人的初始位置、行走速度、步长,室内设置的障碍物等,但如果完全随机地行走,形成的纹理必然是几乎处处相似,或存在某种从中心到四周的辐射对称性,看不出一般室内的行走规律。“其实世上本没有路,走的人多了,也便成了路”,事实上并不是室内地面的每一处都被人均匀地踏到,而是存在相对固定的行走路线。

为模拟随机行走路线的确定性与随机性,我们主要考虑了两种行走动作,分别称为巡视(如图1所示)和往返(如图2所示)。巡视就是从门进来,类似观看四周的壁画一样,按照逆时针(或顺时针)方向走动一圈,并离开室内。往返就是类似到固定的座位上工作一样,从门进来,直接到达室内某点,并返回离开。

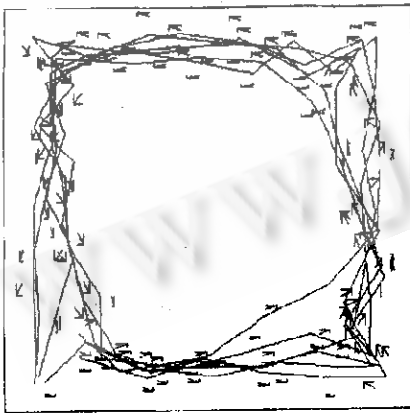


图1 在正方形房间中巡视

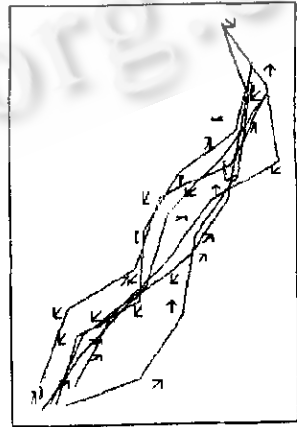


图2 在矩形房间中往返

本文以帧数作为计时标准, t 时刻与 t 帧是同义的。我们设计随机行走路线发生器,基本的方法是给出一个定义域在 $t \in [0, T]$,值域在 $D \in [0, L] \times [0, W] \in [0, \theta]$ 区域上的向量函数 $F(t) = F(x(t), y(t), \theta(t))$,通过此向量函数依次递推地产生一串点列 P_1, P_2, \dots, P_n ,可唯一确定 t 时刻随机行走的位置 $(x(t), y(t))$ 和方向 $\theta(t)$ 。 $F(t)$ 可以递归地定义如下。

$$F(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t-1) + s(t) \cdot \cos\theta(t-1) \\ y(t-1) + s(t) \cdot \sin\theta(t-1) \\ E(x(t), y(t), t) \end{pmatrix},$$

其中 $s(t), t > 1$, 表示 t 时刻随机行走的步长, $E(x(t), y(t), t)$ 为确定 t 时刻随机行走方向的定向函数, 定义见 1.3 节. 为便行走路线更具有随机性, 1.4 节中给出了用正态分布的随机数序列表示参数的随机性的方法. $F(t)$ 的初值控制及参数调整见 1.5 节. 生成的随机行走路线图如图 1、2 所示.

1.3 定向函数

我们的基本思想是, 任一时刻的当前方向只与当前位置有关, 把所有点的方向构成一个平面向量场. 为此, 在约束范围内设计了一个定向函数规定各点的基本方向, 方向类似于电磁场理论中感生磁力线的方向. 可以认为当前方向是以此方向为中心, 在一定范围内符合正态分布, 对大量的脚印都能完全自动地处理方向, 找到出口, 与真实情况相同.

在我们的实验中, 对不同的边界条件(矩形、正方形)及不同的随机行走的动作(巡视和往返), 给出了不同的定向函数

$$E(x(t), y(t), t).$$

在本文中, 我们不引入更多的关于马尔可夫序列的介绍^[15], 只说明此序列的相邻两项表示相邻两步, 后项可通过一个随机矩阵由前项迭代产生.

1.4 参数分布的随机性

人的初始位置、行走速度、步长等参数分布具有随机性. 从 L. F. Henderson 关于 639 人的随机行走速度的统计图^[16]中可以看出, 行走速度是一个以某数为中心的变量, 并且基本符合正态分布. 为此, 我们要求模型中所有的随机数序列 η 都符合正态分布, 即正态随机数, 由如下的形式给出.

$$\eta = \eta(\lambda, \mu, t),$$

其中 t 为时间, $[\lambda, \mu]$ 为变量的变化范围. 产生正态随机数的基本方法有: 求逆法、舍选法、复合法、函数逼近法、概率逼近法、函数变换法以及被认为是最有效的矩形-梯形-尾形方法^[16]等.

1.5 初值控制及参数调整

设 D_0 为给定区域, 在 $t=0$ 时刻, 表示随机行走的位置和方向的向量 $F(0)$ 可给定为

$$(x(0), y(0)) \in D_0, \theta(0) = \eta\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, 0\right).$$

为得到较好的行走路线, 还需反复进行参数调整. 例如, 减小 $[\lambda, \mu]$ 变量的变化范围以控制随机性; 与真实情况成比例地设置步长等参数; 交互地观察产生的效果决定取舍等. 我们用随机行走路线发生器得到了在正方形房间中巡视(如图 1 所示)和在矩形房间中往返(如图 2 所示)的行走路线(人数为 3 个).

2 纹理的过程生成方法

2.1 脚印的位置和方向计算

脚印也同样既具有随机性, 又具有确定性. 确定性是指脚印交替地出现在行走路线的两侧, 随机性来自脚印的形状、大小、位置、方向以及由体重决定的脚印对地板的压强等.

设在 t 时刻, 由随机行走路线发生器 $F(x(t), y(t), \theta(t))$ 所确定的位置为 $(x(t), y(t))$, 方向为 $\theta(t)$, 下面的方法可以确定 t 时刻当前脚印的位置 $(x'(t), y'(t))$ 和方向 $\theta'(t)$.

$$\begin{cases} x'(t) = x(t) - (-1)^t \cdot d(t) \cdot \cos\theta \\ y'(t) = y(t) - (-1)^t \cdot d(t) \cdot \sin\theta \\ \theta'(t) = \theta(t) - (-1)^t \cdot \varphi(t) \end{cases}$$

其中 $(-1)^t$ 是为了区分左右脚印, $d(t)$ 为脚印中心与随机行走当前位置之间的距离, $\varphi(t)$ 为脚印方向与随机行走当前方向之间的偏角, 实践中可以取

$$d(t) = \eta(d_1, d_2, t), \varphi(t) = \eta\left(0, \frac{\pi}{18}, t\right).$$

2.2 脚印处理及地面磨损产生的纹理

脚印是地面磨损的主要原因. 准确地说, 脚印对地面的摩擦力和压力是形成地面磨损的主要原因. 为适当地控制模型的复杂程度, 可以粗略地认为, 地面磨损是由脚印接触及行走时脚尖滑动引起的, 为此, 我们用白纸分别对成年男

子和女子的脚印及带有脚尖滑动效果的脚印分别取样,并通过扫描仪输入计算机,用图象处理软件 PhotoShop 把原始图象处理成大小为 $a \times a$ 的正方形灰度图象 A ,使脚印的旋转中心为图象中心,并且图象的四周留出足够的边缘,以免图象旋转时超出图象的四周边界.为便于图象旋转计算,我们取 a 为奇数,例如 $a=99$.规定图象左上角的坐标为 $(0,0)$ 点,水平为 X 方向,竖直为 Y 方向.

下面我们分两步计算时刻由脚印生成的纹理图象.

2.3 图象旋转处理

(1) 把图象 A 旋转 $\theta'(t)$,记所生成的当前脚印图象为 $B(t)$,其 (i,j) 位置的象素值 $B_{i,j}(t)$ 是由图象 A 中的 (x,y) 位置值 $A_{x,y}(t)$ 绕图象中心 $(\frac{a-1}{2}, \frac{a-1}{2})$ 旋转得到的.

$$B_{i,j}(t) = A_{x,y}(t),$$

其中

$$\begin{cases} x = \frac{a+1}{2} + (i - \frac{a+1}{2}) \cdot \cos\theta'(t) + (j - \frac{a+1}{2}) \cdot \sin\theta'(t), \\ y = \frac{a+1}{2} + (j - \frac{a+1}{2}) \cdot \cos\theta'(t) + (i - \frac{a+1}{2}) \cdot \sin\theta'(t). \end{cases}$$

为消除由于取整运算“ $[]$ ”带来的舍入误差,我们对 $A_{x,y}(t)$ 的计算采用了如下的双线性插值运算.

$$A_{x,y}(t) = (y - [y]) [y] + 1 - y \left(\begin{matrix} A_{[x],[y+1]}(t) & A_{[x+1],[y-1]}(t) \\ A_{[x],[y]}(t) & A_{[x+1],[y]}(t) \end{matrix} \right) \begin{matrix} x - [x] \\ [x] + 1 - x \end{matrix}.$$

2.4 过程生成的纹理图象计算

(2) 在 t 时刻,当前脚印的图象为 $B(t)$,记过程生成的纹理图象为 $C(t)$,则 $C(t)$ 是把 $B(t)$ 平移到 $(x'(t), y'(t))$ 位置,并与 $(t-1)$ 时刻的纹理图象 $C(t-1)$ 叠加得到的,其 (i,j) 位置的象素值 $C_{i,j}(t)$ 可用以下公式计算(如图 3 所示).

$$C_{i,j}(t) = C_{i,j}(0) + \sum_{\tau} B_{i+\frac{a-1}{2}-[x(\tau)],j+\frac{a-1}{2}-[y(\tau)]}(t) = C_{i,j}(t-1) + B_{i+\frac{a-1}{2}-[x(t)],j+\frac{a-1}{2}-[y(t)]}(t).$$

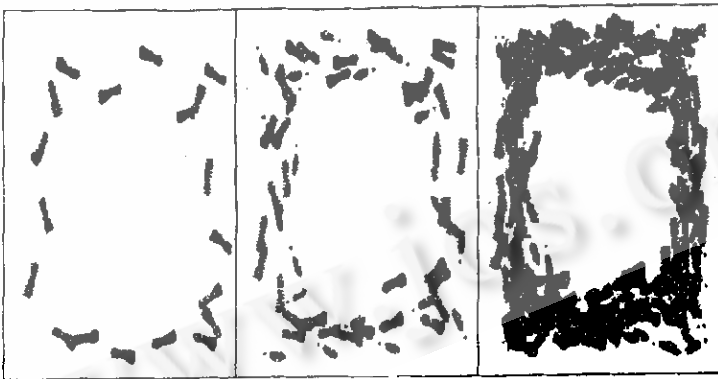


图 3 巡视的演变过程



图 4 往返的纹理图象

3 纹理的过程生成实现及动画

在 SGI Indigo2 上,我们利用 C 语言、GL 库和三维动画软件 Alias | Wavefront Explore 4.2 的图形库,使用上述算法生成了过程生成的纹理图象.产生的纹理具有高度真实感,相邻两帧纹理连续性好,能表现演变趋势等优点(如图 3、4 所示).为说明上述算法的实用性,我们借用上述软件的动画制作环境,利用上述算法产生的纹理图象,进一步生成了一些具有高度真实感的颜色纹理与几何纹理,模拟室内地面的磨损过程,我们可在数秒的动画中直观地看到在实际生活中长时间发生的磨损过程,并可方便地看到地面磨损前后的差别.

由于每秒的动画需要 25 帧纹理图象,单帧计算都采用真彩色图象,每个象素都要进行旋转、插值、取整等运算,因此,计算 30s 动画时间较长.由于工作量较大,我们采用在微机上对参数反复调整,生成行走路线中脚印的数据文件,

并在工作台上生成了纹理图象的方法,实验中通过人为地控制随机行走路线生成器类型的比例(巡视/往返)、脚印类型(男/女/滑动)和脚印的影响程度,调整步长 $s(t)$ 、前进方向、偏角 $\varphi(t)$ 、脚印与行走路线间的距离 $d(t)$ 等表达式的正态分布随机数序列 $\eta = \eta(\lambda, \mu, t)$ 中参数 λ 和 μ 的变化范围,调整出了一些较好的过程生成的纹理序列。应该指出,调整合适参数的工作是一项耗费时间的工作。由于数据文件与计算分离,我们采用了多个计算机分别计算不同阶段、代码优化、计算小图用于预览、再计算大图生成最终结果等方法。

4 结 论

纹理的生成模型是计算机图形学研究的重要课题之一。本文给出了一种新的自然纹理的生成方法——过程生成方法。我们采用马尔可夫序列理论设计了一个较为精确的随机行走发生器,解决了路线规划中的静态故障避免问题,并以此发生器按过程生成方法生成了自然纹理。由于纹理直接生成,不会产生贴图具有的走样效果,生成的真彩色图象细致真实;由于本方法经迭代产生,相邻两幅纹理图象保持了很好的连续性;而采用计算机动画技术模拟纹理的动态生成过程则既可以生成纹理,又可以提供纹理的演化生成过程。

我们看到,本方法还存在计算量较大、难于调整局部参数等缺点。由于纹理由迭代产生,不便于对个别帧局部修改,反复调整参数时都要重新生成。这是迭代法固有的缺点,无法从方法上彻底解决,取得较好的效果还主要依赖于反复交互式调节。计算量较大,则主要依赖于数据文件与计算分离和计算机的计算能力。本方法已是一种真正模拟纹理生成过程的实用方法,但对改进方法本身,减少计算量仍然具有重要的意义。

作为应用,本文给出了几组例子,并利用计算机动画直观形象的特点,把室内地面长时间的磨蚀过程在短短的数秒内表现出来,既利于预先浏览,又利于比较效果。这种方法还可用于模拟雨点、流水痕迹、车辙、汽车车窗、楼梯表面等因外部因素长期作用形成的纹理效果。

参 考 文 献

- 1 唐荣锡,汪嘉业,彭群生等. 计算机图形学教程. 北京:科学出版社,1990
(Tang Rong-xi, Wang Jia-ye, Peng Qun-sheng *et al.* Computer Graphics Tutor. Beijing: Science Press, 1990)
- 2 Krueger Wolfgang. Intensity fluctuations and natural texturing. Computer Graphics, 1988,22(4):213~220
- 3 Schweizer Dino. Artificial texturing; an aid to surface visualization. Computer Graphics, 1983,17(3):23~25
- 4 Hassner Martin, Sklansky Jack. The use of Markov random fields as models of texture. Computer Graphics and Image Processing, 1980,(12):357~370
- 5 徐迎庆. 流水,波浪及自然纹理的模拟与生成[博士论文]. 中国科学院计算技术研究所,1997
(Xu Ying-qing. Simulation of Water, Waves and Natural Texture [Ph. D. Thesis]. Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, 1997)
- 6 Monne J, Schmitt F, Massaloux. Bidimensional texture synthesis by Markov chains. Computer Graphics and Image Processing, 1981,(17):1~23
- 7 Perlin Darwyn R. Solid texturing of complex surfaces. Computer Graphics, 1985,19(3):279~286
- 8 Haruyama Shinichiro, Barsky Brian A. Using stochastic modeling for texture generation. IEEE Computer Graphics and Application, 1984,4(3):7~19
- 9 Schachter Bruce, Ahuja Narendra. Random pattern generation processes. Computer Graphics and Image Processing, 1979,(10):95~114
- 10 Fournier Alain, Fussell Don, Carpenter Loren. Computer rendering of stochastic models. Communications of the ACM, 1982,25(6):371~384
- 11 Gagalowicz Andre, Ma Song-de. Model driven synthesis of natural textures for 3-D scenes. In: Proceedings of EUROGRAPHICS '85. 1985. 91~108
- 12 Yokoyama Ryuzo. Texture synthesis using a growth mode.. Computer Graphics and Image Processing, 1978,(8):369~381
- 13 Latham W. The applications of evolutionary and biological processes to computer art and animation. In: James T Kajiya ed. Proceedings of SIGGRAPH'93. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1993. 389~390
- 14 Sims K. Artificial evolution for computer graphics. Computer Graphics, 1991,25(4):319~328
- 15 张世英,杨盈. 随机过程与控制. 西安:西安交通大学出版社,1989
(Zhang Shi-ying, Yang Ying. Random Process and Control. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989)
- 16 吴新瞻,吴新垣. 随机模型与计算机模拟. 北京:电子工业出版社,1990
(Wu Xin-zhan, Wu Xin-huan. Random Model and Computer Simulation. Beijing: Electronics Industry Press, 1990)

- 17 Thalmann N Magnenat, Thalmann D. 罗以文[译]. 计算机动画理论与实践. 北京: 海洋出版社, 1995
(Thalmann N Magnenat, Thalmann D. Luo Yi-wen (translated). *Computer Animation Theory and Practice*. Beijing: Haiyang Press, 1995)
- 18 Kaye B H. 徐新阳, 康雁, 陈旭等[译]. 分形漫步. 沈阳: 东北大学出版社, 1994
(Kaye B H. Xu Xin-yang, Kang Yan, Chen Xu *et al* (translated). *A Random Walk Through Fractal Dimensions*. Shenyang: Northeast University Press, 1994)

Natural Texture Procedurally Generation and Animation

SU Cheng¹ MA Xiang-ying¹ LI Hua¹ LIU Shen-quan¹ LI Dong-guo²

¹(CAD Laboratory Institute of Computing Technology The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

²(Capital University of Medical Sciences Beijing 100054)

Abstract A new available method—procedurally generation method and its animation are given in this paper. Marcov sequence theorem is used to solve the static obstacle avoiding problem in Computer Animation and Robotics, so as to generate the walking route, render the in-door floor texture, as the result, the authors give the abasing procedure animation which is convenient to preview and compare the effects. This method is highly realistic, easy to express continuation and tendency in texture generation, the authors also give the method to deal with the difficulty to adjust the parameter as well as the huge computation.

Key words Computer animation, natural texture, procedurally generation, random walking, Marcov sequence.