



HAL
open science

基于着色区间约束的法向纹理编辑方法

Shiming Zou, Hongxin Zhang, Qian Bolei, Xavier Granier

► **To cite this version:**

Shiming Zou, Hongxin Zhang, Qian Bolei, Xavier Granier. 基于着色区间约束的法向纹理编辑方法. *Jisuanji-fuzhu-sheji-yu-tuxingxue-xuebao / Journal of computer-aided design & computer graphics*, 2011, 23 (12), pp.2067-2073. <hal-02133560>

HAL Id: hal-02133560

<https://hal.science/hal-02133560>

Submitted on 20 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

基于着色区间约束的法向纹理编辑方法

邹世民¹⁾, 张宏鑫¹⁾, 钱博磊¹⁾, Xavier Granier²⁾

¹⁾(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾(IPARLA Group, INRIA Bordeaux Sud-Ouest, Talence 33405 France)

(zhedafantasy@gmail.com)

摘要: 为了适于真实及非真实感图形绘制,提出一种基于绘制着色图的法向纹理编辑方法.通过引入着色区间约束概念,设计了一个法向纹理到着色图的非线性二次规划问题模型,并利用 GPU 技术实现了算法加速,方便了用户交互操作.实验结果表明,对于 1024×1024 大小的法向纹理,迭代计算的平均时间为 3.6 ms,能够达到实时的交互.

关键词: 法向贴图;实时编辑;GPU;从着色重建形状;区间约束

中图法分类号: TP391

Normal Texture Editing Based on Shading Interval Constraints

Zou Shimin¹⁾, Zhang Hongxin¹⁾, Qian Bolei¹⁾, and Xavier Granier²⁾

¹⁾(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾(IPARLA Group, INRIA Bordeaux Sud-Ouest, Talence, 33405 France)

Abstract: In this paper, we propose a novel method for normal texture editing based on shading maps. The presented method can be applied on both photo-realistic rendering and non-photorealistic rendering (NPR). By introducing shading interval constraints, the normal texture editing problem is characterized by a quadratic programming approach, which can be accelerated by GPU techniques. Experiments are presented, showing that for a 1024×1024 size normal texture, the computation costs only 3.6 milliseconds. The experimental results show that our proposed method is user-friendly and can be performed in real-time.

Key words: normal map; real-time editing; GPU; shape from shading; internal constraints

传统 3D 建模工具的复杂和烦琐迫使人们去寻求更加便捷和直观的建模方式.近年来,有大量学者致力于草图建模法的研究^[1-2].该方法基于曲线或手势实现对模型的局部控制,用户通过少量的草图绘制,例如非连续性的线段、轮廓线以及等值线等,来隐式地定义手绘特征曲线的性质;也可以通过对绘制区域^[3]进行均匀分割的方式来定义特征线.

物体表面的连续着色及其变化是人类视觉构建形状场景信息的重要依据^[4],被称为 shape from shading,或简称为 SfS.很自然地,人们联想到通过

绘制修改法向贴图的着色达到编辑模型目的^[5-7].但是,现有的工具一般只能提供间接的模型编辑能力^[6-7],或者通过曲面间的映射^[5,7]来实现模型编辑的目的,输出结果往往与输入大相径庭,大大降低了用户友好性.

以上方法都受限于着色的物理准确性.在计算机图形学中,为了方便视觉信息传输,用户常希望创建非真实的渲染输出,例如卡通着色算法^[8]通过等发光率表示形状.为获得理想的视觉效果,即使对非真实渲染输出的结果,用户也希望能具有修改着色图特征的能力^[9-10].

Olsen 等^[1]的研究强调了在修改非真实渲染结果的应用中草图法和绘制法具有很大的相似性,两者都是基于关键视觉特征的应用. Nealen 等^[11]指出基于草图的方法可被视为非真实渲染的逆过程. 受到卡通着色算法的启发,本文通过着色区间来实现一种功能更强大的着色建模方法.

着色值主要与物体的表面朝向有关,即与物体的法向场有关. 在计算机图形学应用中,通过为低精度的三维模型赋予法向纹理,便能在视觉上呈现出复杂逼真的模型效果. 此外,对于真实或非真实渲染输出的着色值,根据几何的光照计算公式可以分离出三维坐标. 但是,由于法向信息仅在和光源进行计算后才具有可辨识的视觉意义,因此直接编辑法向图像比较困难,要得到理想的修改结果,用户不得不对光照现象以及几何知识有深入的了解. 为此,本文力图寻找一种用户友好的编辑工具.

为了实现该目标,本文首先构造了着色信息与形状信息转换的二次方程,并引入了着色区间约束;其次,采用并行迭代的求解方法使用 GPU 实现算法加速,提供了实时的用户交互体验;最后开发了对应法向场的交互编辑工具. 我们将在下文中展示一系列的应用模块,同时讨论真实感与非真实感绘制应用的实例.

1 相关工作

前人关于通过着色图编辑法向场的研究工作主要有以下几个方面. Overveld^[12]通过扩展 Williams^[13]的工作,引入了一种基于梯度的模型绘制修改工具;但用户仅能在一些特定的梯度上进行绘制修改操作,极大地限制了用户的自由. Rushmeir 等^[14]提出了一种新颖的 3D 图形数字修复工具,可通过克隆着色图填补缺失部分实现修复. 以上方法都应用了相似的最优化技术,从而使其结果拥有较强的抗噪能力,适用于画家的手绘作品^[15];但它们都无法保证运算结果是否与用户绘制的着色图匹配.

为克服上述难题, Gingold 等^[6]提出了一种更有效的方法,通过定义新的变形工具来调节着色图的亮度以及移动着色图中高光的位置;但这些操作限制了对模型的调节能力且是一种间接的着色图修改方式. Wu 等^[5,7]引入了一些针对形状的变形函数以及法向旋转函数,但这些工具仅仅提供了一些稀疏的类曲线控制,使用者需要接受专业训练才能有效地获得预期效果.

自 Horn 等^[16]提出可以根据着色图恢复形状信息的思想后,涌现出了一系列采用最小化技术实现 3D 图形到着色图的转化方法^[17]. 最优化技术在任何输入下都能重构出曲面^[16],但是其输出结果可能和用户输入的着色图并不匹配,无法很好地应用于用户交互中. Ng 等^[18]通过使用稀疏约束在一定程度上缓解了这个问题,但仍然需要求解全局最小值.

为了提高结果和输入着色图间的相关性, Worthington 等^[19]将最优化的构成分解为 2 个部分:一部分是形状的光滑度,另一部分是着色值约束. 但由于没有弱化着色值对结果的约束程度,导致该算法无法求解非真实的着色图输入. 本文的主要出发点是着色值具有一定的区间分布特性,例如测量误差、显示量化、卡通着色以及不可见偏差等,希望通过降低着色值中潜在的、非真实值带来的约束影响,确保输入/输出间的相关性,同时又可扩展求解的范围.

另一个较为普遍的问题是当着色图的光源固定在视点观察方向时,会引起凹凸结构模糊性^[4,20]. 由于求解模糊性输入时初始数据只能通过猜测确定,因而具有不准确性,本文将通过编辑法向场来应对这个问题.

2 基于着色区间约束的编辑

下面以一种简单的量化卡通着色图^[8]为例来详细说明本文的方法. 一般情况下,定义区间的方式有 2 种:一种是基于视觉感知中的视差^[21];另一种是应用经典的 255 级量化方式. 本文实现的实时编辑系统能够确保绘制的图像与输出图像不存在可感知的视觉差别.

2.1 着色区间定义

卡通着色图采用经典的量化分级方式连续着色,为了提供区域内的细节,着色常常带有自遮挡性. 本文采用非归整的余弦着色^[22]来表示漫射值

$$s = \frac{1 + \langle \mathbf{n}, \mathbf{l} \rangle}{2};$$

其中, \mathbf{n} 中代表法向, \mathbf{l} 代表归一化的光照方向. 本文系统采用

$$q(s) = \left(\frac{\lfloor s^{1/\gamma} N \rfloor}{N} \right)^\gamma \quad (1)$$

对连续的着色值进行量化处理. 其中,指数参数 γ 通过控制着色等值线的离散程度来创建平滑的着色区

间;内积 $\langle \mathbf{n}, \mathbf{l} \rangle \in [\alpha_i, \alpha_{i+1}]$, $\forall i=0, \dots, N-1$ 用于量化数据对象. 量化区间由

$$\begin{cases} \alpha_i = 2 \left(\max \left(\frac{i-0.5}{N}, 0 \right) \right)^\gamma - 1 \\ \alpha_{i+1} = 2 \left(\min \left(\frac{i+0.5}{N}, 0 \right) \right)^\gamma - 1 \end{cases} \quad (2)$$

决定. 该方法能够弱化形状重构中的着色值约束, 灵活地降低了生成不合理曲面的概率.

此外, 通过引入一个新法向 \mathbf{n}' 的约束, 将着色值扩展到整个区间内, 确保了输入/输出间着色值的相关性. 具体表达为

$$\mathbf{C}_i; \langle \mathbf{n}', \mathbf{l} \rangle \in [\alpha_i, \alpha_{i+1}] \quad (3)$$

本文采用二阶自由度(如图 1 b 所示, 两者间的夹角属于一个区间)取代了一阶自由度(如图 1 a 所示, 预估的法向方向和光照法向间的夹角是固定的), 则所有对应的法向都将生成同样的离散着色数据.

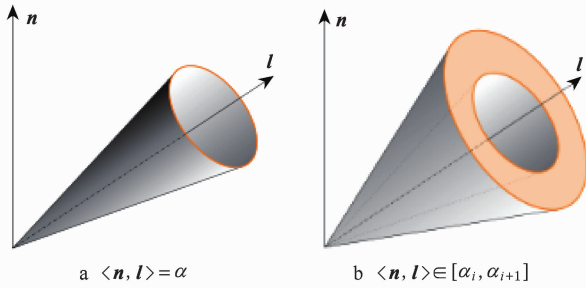


图 1 着色重构形状

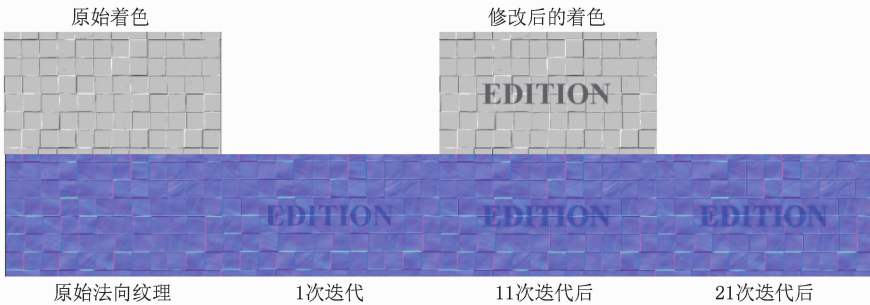


图 2 二次规划问题的近似迭代解图示

2.3 并行近似解

虽然一般二次规划问题可使用现有软件包求解, 但是必须考虑法向的归一化, 因而第 2.2 节所提出的问题不再是线性问题. 为此, 本文采用迭代算法求解, 在每次迭代过程中对法向量进行重新归一, 此方法已应用在文献[19]的着色图恢复形状信息的算法中. 为进一步提高系统的用户交互能力, 本文系统采用 GPU 进行加速计算. 为达到理想的效率, 需要减少现有算法中的全局锁, 例如避免了文献[23]的

2.2 着色图到新法向的转换

在几何编辑领域中的研究表明^[23], 通过最小化拉普拉斯算子的方式可以保留原始模型的整体细节. 为了在着色图和法向间的转换中保留更多的原始图形信息, 本文针对法向数据在图像空间中引入了一种类似 Laplace-Beltrami 的新算子

$$D(\mathbf{n}_j) = \mathbf{n}_j - \frac{1}{|V_j|} \sum_{k \in V_j} \mathbf{n}_k \quad (4)$$

其中, V_j 表示与 \mathbf{n}_j 相邻点的法向值集合, 而 $|V_j|$ 表示集合 V_j 的大小.

新的法向值需要满足用户输入的着色约束, 即式(2), 同时要使得式(4)所示算子的值变化最小. 于是可以得到如下的二次规划问题

$$\begin{cases} \min \sum_j \| D\mathbf{n}'_j - D\mathbf{n}_j \|^2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} \langle \mathbf{n}'_j, \mathbf{l} \rangle \leq \alpha_{i+1} \\ \langle \mathbf{n}'_j, \mathbf{l} \rangle \geq \alpha_i \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

此处将经典的最小值求解法拆分为两部分, 该方法在 Worthington 等^[19]的实验中已得到了成功应用. 与此不同的是, 本文采用线性不等式取代了文献[19]中的线性恒等约束. 与大多数从着色图恢复形状信息方法遇到的问题一样, 由于约束方程是非线性的, 单位长度的法向结果无法保证本文公式的成立, 为此只好将归一化后的输出结果作为新的初始数据再重新计算一遍. 图 2 所示为这个二次规划问题迭代次数不同时对结果的影响.

并行锁问题.

综合考虑, 本文提出了迭代算法, 步骤如下:

Step1. 在每一次迭代中独立地对每个像素 j 进行并行计算. 设当前迭代次数为 k , 求 $\tilde{\mathbf{n}}_j^k$ 使得 $\| D\tilde{\mathbf{n}}_j^k - D\mathbf{n}_j \|^2$ 最小化.

Step2. 进行归一化, 确保像素 j 的相邻元素的值来自于第 $k-1$ 次迭代.

Step3. 调整 $\tilde{\mathbf{n}}_j^{k-1}$, 使其能够带入式(4)中的约束方程以求解 $\tilde{\mathbf{n}}_j^k$. 该过程需要将预估的法向值映射进闭合的约束空间^[19]

$$\begin{cases} \langle \mathbf{n}_j^k, \mathbf{l} \rangle = \begin{cases} \alpha_{i+1}, \text{ s. t. } \langle \tilde{\mathbf{n}}_j^k, \mathbf{l} \rangle > \alpha_{i+1} \\ \alpha_i, \text{ s. t. } \langle \tilde{\mathbf{n}}_j^k, \mathbf{l} \rangle < \alpha_i \end{cases} \\ \mathbf{n}_j^k = \tilde{\mathbf{n}}_j^k, \text{ s. t. } \langle \tilde{\mathbf{n}}_j^k, \mathbf{l} \rangle \leq \alpha_{i+1} \ \&\& \ \langle \tilde{\mathbf{n}}_j^k, \mathbf{l} \rangle \geq \alpha_i \end{cases} \quad (6)$$

3 交互系统

为了展示本文工作的应用,我们实现了一个实时的编辑系统来编辑虚拟现实场景中的法向纹理.用户只需要修改不同光线下的着色,系统就会自动地将这种改变体现在法向区域.利用基于 GPU 的近似算法^[24],所有的编辑操作都能做到实时.

3.1 光源位置

本文系统中,场景中的物体被一指定的平行光源照射,然而光源的设置 在 3D 虚拟现实环境中的影响是十分巨大的.为了解决这一难题,我们引入了 Navidget 控件^[25]来控制光的方向,如图 3 所示.可以看出,整个过程人机交互非常简单,可直观地获取光源方向,结果的转换也只与方向的变换有关.采用这种方法,光源的操作只需要几个简单的鼠标手势即可完成.

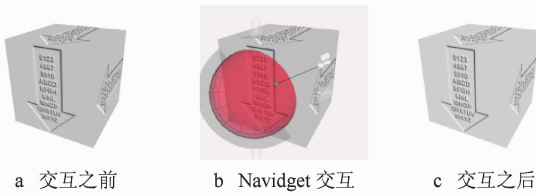


图 3 通过 Navidget 操纵光源方向

3.2 着色画刷

任何现有的图形编辑工具只要保存相应的量化等级,都可以被用来修改着色值.本文系统中引入了 2 种不同的编辑画刷:第一种是传统的绘制画刷,用于直接绘制明暗值.具体数值可以直接从原图中选择;或者直接由用户指定,此时该值必须被转化为离散值.这种画刷适用于较低层级的离散化时,或者当用户准确地知道期望结果、需要仔细地调整明暗效果时.

第二种被称作亮度画刷,用于间接地增减着色值的大小.事实上,亮度画刷是一个缩放操作

$$\begin{aligned} q' &= \beta q, \\ \beta &= (q^{1/\gamma} N \pm 1)^\gamma / q; \end{aligned}$$

从而实现增大(或减小)着色值到高(低)一层级的离散值.注意,需归整 β 来保证 $\beta \geq 0$.为了更好地保持原始的明暗变化,我们在画刷中使用一个高斯透明通道图来保证笔锋边缘与 β 的平滑转换.由此,画刷

修改过的明暗值为

$$q' = \left(\frac{\lfloor ((1 - \alpha + \alpha\beta)q)^{1/\gamma} N \rfloor}{N} \right)^\gamma.$$

此类画刷能在改变局部光照程度的同时又保存原有纹理的变化效果.它可视为 Gingold 等^[6]用于几何编辑的简化版本,以适应本文系统,而亮度画刷直接作用于明暗空间.当离散层级提高时,此类画刷是非常有效率的.

3.3 编辑模式

通过改变明暗值来编辑法向纹理的好处是:产生的结果可以在任意光源下使用.为了便于用户交互,需要保证用户做出的编辑修改可作用于不同的光线之下,如图 4 所示.

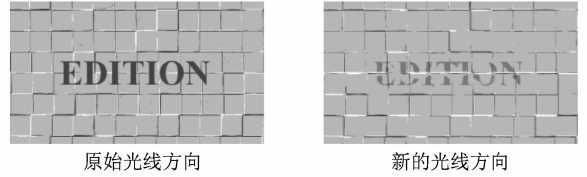


图 4 在新的法向纹理中改变光线方向

第一种模式是基于每一步操作都能得到可能的法向区域值的假设,称为累积模式.此模式下,用户在不同的光源位置修改同一块法向区域,随着每一次着色修改以及光线改变,用上一次修改过的值作为新的初始值,代入求解齐次方程式(5).

因为在不同方向光线下的着色必须一致,因此这种方法降低了用户的操作自由度.在某些情况下,用户更喜欢进行完全的着色控制^[10].为此,本文引入了第二种模式,称为插值模式.需要说明的是,一旦进入该模式,将不能够再回到累积模式.

在插值模式下,用户需指定若干个主光线方向及其对应的多重法向区域.对每一个主光线方向,用户修改的着色值对应一些不同的法向区域.对于非主光线方向,实际的法向区域值(不是着色值)是从 3 个相邻光线方向中插值得到的.

插值计算通过以下方式实现.由于所有光线方向都被设为单位长度,因此它们是在一个单位的 3D 球体中.如果少于 3 个方向,就是一个近似线性的插值在球体中.对于数量多一点的主要光线方向,我们对每一个新的主要光线方向进行一个球面三角增量.对一个新的光线方向,查询哪个球面三角形包含了它.令 $(\omega^a, \omega^b, \omega^c)$ 作为这个球面三角形的重心坐标,具体计算时可用它对应的平面来近似.对于每一个元素 j ,通过归一化的线性插值来计算它的新法向值

$$n_j = \frac{\omega^a n_j^a + \omega^b n_j^b + \omega^c n_j^c}{\|\omega^a n_j^a + \omega^b n_j^b + \omega^c n_j^c\|}.$$

因为法向插值是通过每个像素的计算得到的,它可以轻易地整合到基于 GPU 计算的框架中,着色插值也因此很自然被引入。

累积模式的好处是只需要存储一份纹理,但它并不能保证编辑过的着色能够在另一个光源下的编辑执行时保持一致,而插值模式使得用户能够自由地设计着色,所付出的代价是需要存储多份纹理。

由不同光线方向插值得到着色值,本文方法借鉴了文献[10]的思想与方法,然而,文献[10]的工作是侧重于对特定基于边界传播的补偿插值,该方法不改变法向的形状,本文方法中同时充分利用了着色限制的信息以及法向输入,因此,本文的框架能够得到与文献[10]一样的结果但却可以有更多的交互控制。

4 实验结果及讨论

我们实现了如第 3 节中所描述的原型系统,并且对各种条件下的法向纹理编辑进行了实验,结果如图 5~8 所示,其中投射到法向纹理上的光线方向用黄色来标识,图 5 展示了本文方法在实际三维场景建模中的应用。

本文实验是在主流的图形工作站上实现的,采用 Intel Core 2 Quad 2.4 GHz CPU, NVIDIA GeForce8600-GT GPU. 在本文的所有例子中, CPU 的计算只使用了一个核,对于第 3.3 节中所给出的近似解方法,我们固定迭代次数以求解方程式(6),因此 GPU 的计算代价是一定的,该部分的计算复杂性理论上与纹理图片的分辨率以及迭代次数成正比. 在我们的实验平台中已经证实,对于 $1024 \times$

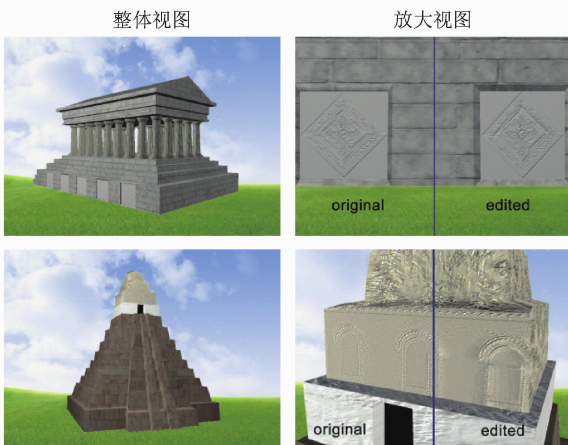


图 5 三维场景中的法向纹理编辑

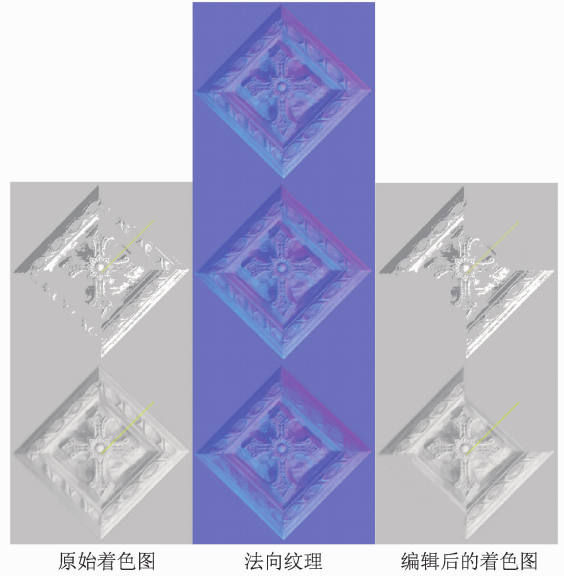


图 6 取光线方向(1.0,1.0,1.0)时绘制画刷的编辑实例

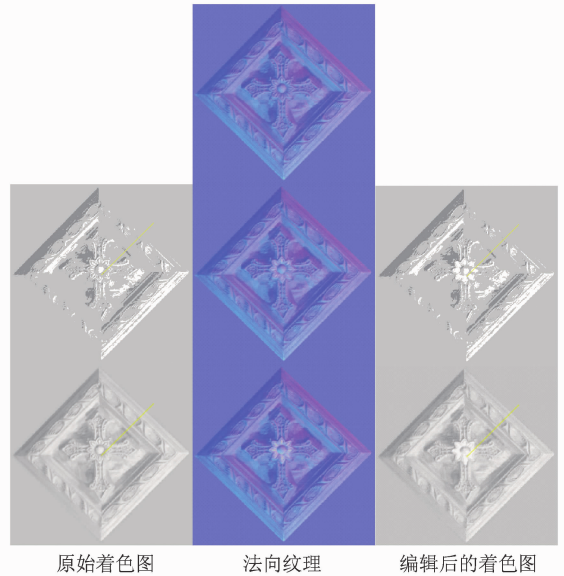


图 7 取光线方向(1.0,1.0,1.0)时亮度画刷的编辑实例

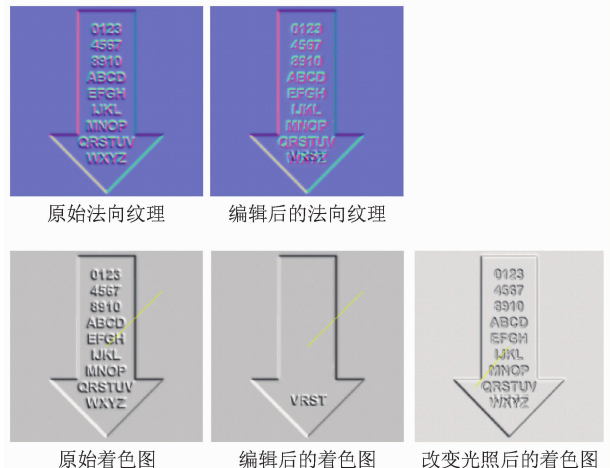


图 8 在不同光线方向下变形且同时保证一个法向纹理

1024 大小的法向纹理,迭代计算的平均时间为 3.6 ms,表明本文方法能够达到实时的交互。

为了阐明不同编辑画刷的区别,我们分别在图 6,7 中展示了使用绘制画刷与亮度画刷的编辑过程。正如第 3.2 节中提到的,亮度画刷是用来增大或者减小着色值,这对于修改复杂的法向区域同时又保持原始法向的分布十分有意义。绘制画刷则允许编辑更显著的着色变化。

本文方法能够创建具体的着色效果。如图 8 所示,可以在对视觉上不同的形体进行变形的同时又保持单重纹理(在累积模式下)或多重纹理(在插值模式下)。与文献[10]相比,本文方法不需要复杂的插值过程,同时能够保证不同光线方向下的照明相关性。

因为本文只是展示了一个原型系统,所以所讨论的系统具有一定局限性。目前我们只能在有限多的光线方向下进行法向编辑。事实上,本文方法通过在每一个方程中使用单独的光线方向来计算像素,可以扩展到点光源。这将允许本文方法使用在非平面的表面,比如可以使用几何图像^[26]或者直接解 3D 表面上的着色产生法向问题。

本文方法可以通过引入着色上的不等约束,成功地编辑法向区域。下一步将是通过类似的方法直接在 3D 表面进行编辑。Ng 等^[18]已经证明一个三维点到二维图像的投射可以被用作三维几何的重建约束。类似于本文的着色区间约束,可以考虑将二维的位置扩展成一个像素。

本文方法在同一时刻仅使用一个光线方向,保证了所有的约束不会与其他应用冲突。累积模式允许整合其他光线方向上的约束,但不能保证前一次用户所做的修改被保存。今后我们将尝试在一次迭代中使用多光源方向的约束的可能性。如果这样的约束发生冲突,系统仍能转回到插值模式。我们要找到这 2 种模式的最佳平衡点来保证最小的存储消耗,同时保存用户所绘的着色结果。最后,我们将更深入地探索本文方法,用于推测真实图像中的法向与形状。

5 结 论

本文提出一种新的基于生成着色的方法来编辑法向区域,为此,提出了一种新的法向约束方法,它来自于着色方程及其相关的并行交互算子,该算子能利用多核结构,如 GPU 的优势;同时引入了一系

列的工具来编辑 3D 虚拟场景中的着色值。实验结果表明,本文方法适合于广泛的法向区域编辑,从真实感的场景到非现实感的场景均可应用。本文方法将来还能够被扩展到完全的从图片生成近似的形体方法中去。

参考文献 (References):

- [1] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, *et al.* Sketch-based modeling: a survey [J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33 (1): 100-118
- [2] Cook M T, Agah A. A survey of sketch-based 3-D modeling techniques [J]. *Interacting with Computers*, 2009, 21 (3): 201-211
- [3] Bernhardt A, Pihuit A, Cani M P, *et al.* Matisse: painting 2D regions for modeling free-form shapes [C] // *Proceedings of Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2008: 57-64
- [4] Ramachandran V S. Perceiving shape from shading [J]. *Scientific American*, 1988, 259(2): 76-83
- [5] Wu T P, Tang C K, Brown M S, *et al.* Shape-palettes: interactive normal transfer via sketching [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 44-45
- [6] Gingold Y, Zorin D. Shading-based surface editing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9
- [7] Wu T P, Sun J, Tang C K, *et al.* Interactive normal reconstruction from a single image [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 91-99
- [8] Decaudin P. Cartoon looking rendering of 3D scenes [R]. Talence; INRIA, RR-2919, 1996
- [9] Johnston S F. Lumo: illumination for cel animation [C] // *Proceedings of International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*. New York: ACM Press, 2002: 45-53
- [10] Todo H, Ichi Anjyo K, Baxter W, *et al.* Locally controllable stylized shading [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 17-19
- [11] Nealen A, Sorkine O, Alexa M, *et al.* A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 1142-1147
- [12] van Overveld C W A M. Painting gradients: freeform surface design using shading patterns [C] // *Proceedings of Graphics Interface*. Toronto: Canadian Information Processing Society Press, 1996: 151-158
- [13] Williams L. 3D paint [C] // *Proceedings of Semi-Implicit 3D Model for Estuarine Circulation*. New York: ACM Press, 1990: 225-233
- [14] Rushmeir H, Gomes J, Balmelli L, *et al.* Image-based object editing [C] // *Proceedings of International Conference 3-D Digital Imaging and Modeling*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 20-28

-
- [15] Kerautret B, Granier X, Braquelaire A. Intuitive shape modeling by shading design [M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg; Springer, 2005, 3638; 923-936
- [16] Horn B K P, Szeliski R S, Yuille A L. Impossible shaded images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 27(2); 166-170
- [17] Prados E, Faugeras O. Handbook of mathematical models [M]. Heidelberg; Springer, 2006; 375-388
- [18] Ng H S, Wu T P, Tang C K. Surface from gradients with incomplete data for single view modeling [C] //Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computer Vision. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2007; 1-8
- [19] Worthington P L, Hancock E R. New constraints on data-closeness and needle map consistency for shape-from-shading [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(12); 1250-1267
- [20] Adelson E H, Pentland A P. Perception as Bayesian inference [M]. Cambridge; Cambridge University Press, 1996; 409-423
- [21] Daly S. Digital images and human vision [M]. Cambridge; MIT Press, 1993; 179-206
- [22] Rusinkiewicz S, Burns M, Decarlo D. Exaggerated shading for depicting shape and detail [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3); 1-9
- [23] Gondzio J, Grothey A. Parallel interior point solver for structured quadratic programs; application to financial planning problems [J]. Journal of Annals of Operations Research, 2006, 152(1); 319-339
- [24] Botsch M, Sorkine O. On linear variational surface deformation methods [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(1); 213-230
- [25] Hachet M, Declé F, Knodel S, *et al.* Navidget for 3D interaction; camera positioning and further uses [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2008, 67(3); 225-236
- [26] Gu X, Gortler S J, Hoppe H. Geometry images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3); 355-361