

三维模型特征笔画的风格化绘制

景昊[†] 周秉锋

北京大学计算机科学技术研究所,北京 100871; [†]E-mail:jinghao@pku.org.cn

摘要 提出一个基于特征笔画的三维模型风格化绘制方法,能够在风格化绘制的同时,很好地描述三维模型的表面特征。首先定义了基于顶点径向曲率的分割标准函数和能量函数,采用能量最小化的 GraphCuts 算法将三维模型表面的特征顶点和非特征顶点进行分割,连接特征顶点构成三维模型的特征笔画。在获取特征笔画后,采用纹理映射的方法生成风格化绘制效果。还提出两种纹理坐标的计算策略,可分别用于生成不同的风格化绘制结果。相比已有的方法,本方法能很好的表现模型的特征,且生成的笔画风格易于控制。

关键词 风格化绘制; 特征笔画; 图分割算法

中图分类号 TP391

Stylized Rendering of 3D Models Based on Feature Strokes

JINGHao[†], ZHOUBingfeng

Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871; [†]E-mail:jinghao@pku.org.cn

Abstract A method for generating stylized rendering image from triangle mesh models is presented based on feature strokes. First, the segmentation standard function and energy function based on radial curvature is defined. Second the feature vertices on 3D model are segmented automatically by graph cuts algorithm with energy minimization. Feature vertices are connected to form feature strokes. Texture mapping technique is used to produce stylized image. There are two different texture coordinates computation strategies which can produce different styles. The styles of feature strokes can be controlled easily.

Keywords stylized rendering; feature strokes; graph cuts

基于三维模型的风格化绘制技术,通过一个三维模型生成多种风格化的绘制效果,以给予观察者与照片风格不同的视觉效果,例如卡通画渲染效果等。已有的基于三维模型的风格化绘制算法通常遵循类似的算法框架,首先提取三维模型的表面特征线,包括轮廓线^[1-3]、折痕、边界、特征提示线^[4,5]以及脊线和谷线^[6,7]等。再对特征线进行参数化建模生成笔画路径,控制笔画的宽度、端点、方向等参数渲染生成风格化的特征笔画,以此来绘制三维模型^[8],这类算法的计算过程较为复杂,并且对于三角形数量较多,表面细节较多的三维模型计算速度慢。基于计算速度的考虑,采用对特征线参数化建模进行风格化绘制的算法通常考虑对三维模型的轮廓、折

痕和边界等简单特征信息进行风格化绘制^[8]。

在已有的工作中,研究者提出了关于提取三维模型表面特征线并对提取结果进行风格化绘制的方法^[1,2],这些方法主要针对三维模型的轮廓和折痕特征线。Kalnins等^[8]将轮廓特征边采用 Catmull-Rom 样条曲线进行了参数化,并采用纹理映射的方法进行绘制,该算法的建模过程较为复杂,而且只对模型的轮廓信息进行了提取绘制。文献[10]提出了一种基于三维模型纹理映射的风格化绘制方法,但该方法同样仅能表现模型的轮廓信息,而对于模型表面的细节特征表现不好。在文献[11]中,作者提出了一种三维模型的国画绘制方法,他们首先将模型按照几何特征分成几个部分,形成多个笔画,再通过纹

北京市自然科学基金资助项目(4072013)

收稿日期:2007-07-05; 修回日期:2008-05-22

理映射的方法进行绘制。该方法和本文的方法在过程框架方面类似。但在文献[11]中,作者提出的算法有较大的局限性,该算法将模型按照几何特征分割需要在建模的时候交互的进行,并且只适合构造简单的,表面特征不多的模型。

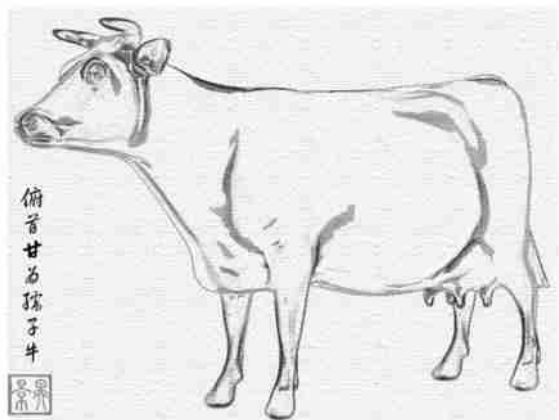
GraphCuts 算法^[12] 是一个常用的分类算法,通常用于图像分割,在二维图像中为每个像素定义对应的能量函数,通过计算得到使得能量函数最小的最优解,从而计算出每个像素属于前景还是背景状态,达到将前景从图像中剥离出来的目的。Graph Cuts 算法也可以用于图像合成^[13] 等二维图像的相关应用。

提取特征笔画以后,通常采用纹理映射方法进行风格化绘制。除此之外,一些研究者还提出了通过交互式算法对笔画进行风格化绘制的方法。Strassmann^[14] 最早对毛笔绘画进行了建模,通过笔刷、笔画、浸润和纸张四个因素进行控制。文献[15]利用 LBM 模型建立了一个交互式水墨画绘制系统,在建立三维毛笔模型的基础上,重点研究了针对墨水扩散的改进,取得了非常好的绘制效果。这些交互式方法适合为艺术家提供风格化创作平台,而针对三维模型的风格化绘制,仍需对特征笔画进行提取和建模。考虑到计算量和绘制风格的可控制性,本文仍选择纹理映射方法作为笔画的风格化绘制策略。

本文提出的特征笔画提取算法是基于 Graph Cuts 分类算法的,通过定义相应的能量函数,全局的计算模型上的特征点,得到模型上的特征笔画,可应用于更多的复杂模型,且计算速度较快。算法主要包括两个部分:

1) 提出基于图分割算法(graphcuts)^[9] 的特征笔画自动提取算法,对于三维模型上的每一个顶点,均定义其有两种状态,即特征点和非特征点。通过建立相应的能量函数,可以对所有顶点进行分类,全局地计算出每个顶点属于特征点还是非特征点状态,将各个特征点连接即可构成三维模型的特征笔画。该算法提取的特征笔画能够较好地描述三维模型上轮廓线、特征提示线等多种特征线描述的表面特征。

2) 在获取特征笔画后,采用纹理映射的方法生成风格化绘制效果(见图 1)。本文提出了两种纹理坐标的计算策略,即将每个特征笔画顶点的三维坐标映射到屏幕坐标后计算纹理坐标方法,和通过特



$\lambda=0.3, \mu=2$, 模型三角形数量为 100k

图 1 采用全局纹理映射策略绘制的风格化效果

Fig 1 Stylized rendering using global texture mapping strategy

征顶点的径向曲率计算纹理坐标的计算方法。前一种方法可以较为直观的控制笔画纹理的风格,而后一种方法则可以表现笔画的一些特殊风格(如明暗变化)。

本文提出的对三维模型进行风格化绘制方法的主要优点在于该方法能很好的表达三维模型的表面特征,对于三角形数量较大(100k)的模型也能够达到实时浏览的效果。本文的算法具有通用性,适用于各种拓扑结构的三维模型。

1 基于 GraphCuts 算法的三维模型特征笔画提取

特征笔画的提取是本文风格化绘制方法的关键步骤,本文将提取特征笔画的问题定义为采用 Graph Cuts 分类算法将模型上的顶点分类为特征顶点和非特征顶点,再将特征顶点相连形成特征笔画。Graph Cuts 分类算法常用于对二维(如图像)或三维的规则网格(如体数据)上的数据进行分类,本文将该分类算法扩展至对不规则的三角形网格数据进行分类。与图像分割的应用不同,对三维模型进行特征点分割事先无需进行手工标记。

本文提出的特征笔画提取方法首先计算三维模型上顶点的径向曲率。对于一个顶点数为 N 的三维模型,曲面的某顶点 P 的径向曲率定义如图 2 所示,将视线向量 v 投影到顶点的切平面上,得到向量 w , w 和顶点的法线 n 组成的平面和曲面的交线为径向曲线(radial curve),该曲线在点 P 处的曲率即为曲面上 P 点的径向曲率。径向曲率是一个与视点相关的曲率特征值,由欧拉公式得到:

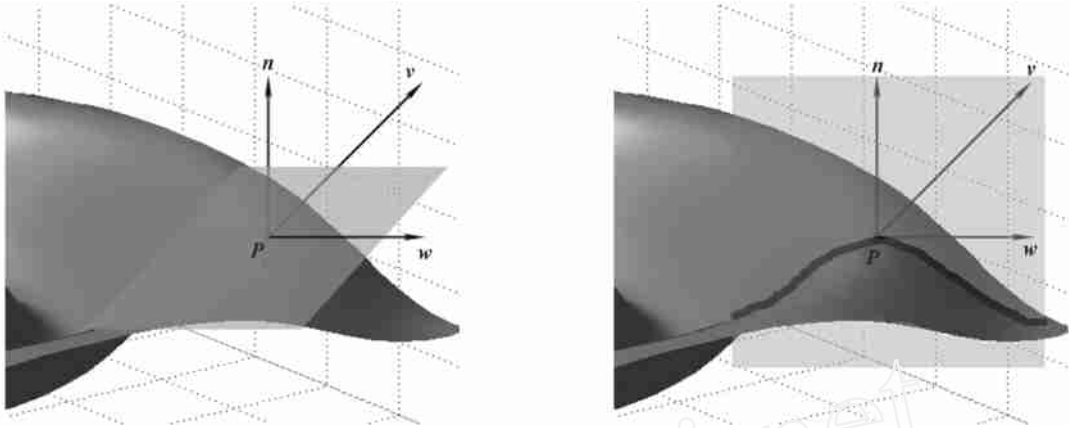


图 2 径向曲率定义
Fig 2 Definition of radial curvature

$$\kappa_r(p) = \kappa_1(p) \cos^2 \phi + \kappa_2(p) \sin^2 \phi, \quad (1)$$

其中 $\kappa_r(p)$ 代表 P 点在当前视点下的径向曲率, $\kappa_1(p)$ 为 P 点的最大主曲率, $\kappa_2(p)$ 为 P 点的最小主曲率, ϕ 是图中的向量 w 和 P 点对应最大主曲率方向的夹角。径向曲率与视点相关, 每一次变换视点, ϕ 都会发生变化, 因此顶点的径向曲率也需要重新计算, 这会增大绘制时的计算量。但本文对采用平均曲率和高斯曲率等视点无关的曲率特征进行了特征笔画提取的实验后发现, 采用径向曲率相关函数作为分割标准函数提取的模型特征效果最佳, 且对于三角形数量在 100k 左右的三维模型可以达到实时绘制浏览的效果, 因此本文仍选择根据径向曲率来设计分割标准函数。

定义函数 f 为本文采用 GraphCuts 算法区分三维模型上特征顶点和非特征顶点的分割标准函数。对顶点数量为 M 的三维模型, 如果顶点 v_j 与顶点 v_i 其同一条边上, 则 v_i 与 v_j 互为邻居顶点, 定义 v_i 的邻居顶点集合为 N_i 。文献[16]提出了一种通过顶点锐化方法放大模型特征的方法, 本文将该锐化框架应用于径向曲率上, 定义函数 $f(v_i)$ 如式(2)和(3)所示。

$$\Delta \kappa_r(i) = \sum_{v_j \in N_i} w_{ij} (\kappa_r(j) - \kappa_r(i)), \quad (2)$$

$$f(v_i) = \kappa_r(i) - \lambda \Delta \kappa_r(i), \quad (3)$$

其中, w_{ij} 为权重函数, λ 为常数, 在本文的计算中, 若顶点 v_i 的邻居数量为 $|N_i|$, 则 w_{ij} 取值为 $1/|N_i|$, λ 在本文中取经验值 0.3。此时, 对顶点数为 M 的三维模型, 对其特征顶点的分割可以表达为一个数组 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\}$, α_i 的取值为 0 或者 1, 当 α_i 为 1 时表示该顶点为特征顶点, α_i 为 0 时表

示该顶点为非特征顶点。求出数组 α 也就得到了三维模型上特征顶点的分布。定义 θ 是分割标准函数 f 的概率分布函数,

$$\theta = \{H(f; \alpha), \alpha = 0, 1\}. \quad (4)$$

采用 Boykov 和 Jolly^[2] 提出的能量最小化方法, 可以根据分布函数 θ 和分割标准函数 f 求出数组 α , 也就得到了每个顶点的状态。定义能量函数 E 如式(5)所示, 当 E 最小时, 相对于三维模型的特征提取效果也最好。

$$E(\alpha, \theta, f) = \mu U(\alpha, \theta, f) + V(\alpha, f), \quad (5)$$

其中 μ 为 $[0, 10]$ 的常数, 可以小范围调节特征提取的细节程度。定义 U 为

$$U(\alpha, \theta, f) = \sum_i [-\log p(f | \alpha, \theta)], \quad (6)$$

其中 $p(f | \alpha, \theta)$ 是 f 的分布函数 θ 在每个顶点位置的概率值。定义 V 为

$$V(\alpha, f) = \sum_{(i,j) \in N} \frac{1}{|v_i, v_j|} [\alpha_i \neq \alpha_j] \cdot \exp(-\beta(f(i) - f(j))^2), \quad (7)$$

其中 $[\alpha_i \neq \alpha_j]$ 为一个预测函数, 其值为 0 或 1, N 为三维模型上邻居顶点构成的顶点对的集合, 常数 β 定义为

$$\beta = \frac{1}{2 E_{pn}((f(i) - f(j))^2)}, \quad (8)$$

其中函数 $E_{pn}(x)$ 是 x 在概率分布函数中的期望值。至此, 能量函数 E 中所有项均被完全定义, 通过求解 E 的全局最小解, 得到数组 α , 即得到了三维模型上特征顶点的分布。

$$\alpha = \operatorname{argmin} E(\alpha, \theta). \quad (9)$$

在算法实现时, 由于传统的 min cut 算法^[14] 在计算时所需计算量大, 本文在实现时采用了改进的

mircut 算法^[9]求解,可大大减少计算量,图 3 显示了常数 μ 取不同值时的特征笔画的提取效果(常数 μ 可以在小范围内调节特征提取的细节程度)。

从算法的框架上看,相比于文献[8]提出的参数建模的方法,本文的算法无需进行建模过程,直接生成了特征笔画,同时又较好的表达了三维模型表面的特征,图 4 左图显示了图 1 所采用的模型的特征提示线提取效果^[4]。通过比较可以看到,本文提取的特征笔画和特征提示线^[4]同样能够很好的表现模型的表面特征。

在提取特征笔画并将其绘制成图像后,为绘制的图像添加一个 alpha 通道,使得绘制结果能够和背景进行交互。如图 1 的纸张背景效果。

2 特征笔画的风格化绘制

为了能够达到尽可能快的绘制速度,本文选择纹理映射的方法实现特征笔画的风格化绘制,提出两种纹理坐标的计算策略进行纹理映射并生成风格化绘制效果。

2.1 基于屏幕坐标映射的纹理坐标计算

在绘制蜡笔这样的笔画风格时,采用基于屏幕坐标映射的纹理坐标计算方法。由于每个特征笔画均由模型表面的三角形构成,因此在纹理映射时采用在每个单独的特征笔画上映射一个纹理的策略。

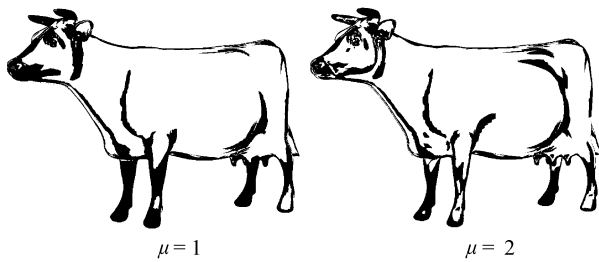


图 3 特征笔画提取效果
Fig 3 Feature strokes extraction result

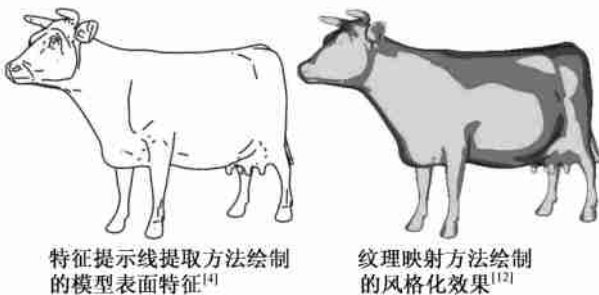


图 4 不同方法绘制的模型表面特征和风格化效果
Fig 4 Suggestive contour extraction result^[4] and stylized rendering result with texture mapping^[12]

略。对于每一个提取出来的特征笔画,将每个特征顶点的空间三维坐标映射到屏幕坐标。将每个特征笔画上特征顶点的屏幕坐标均归一化到[0,1] 区间内作为纹理坐标进行映射。如采用图 5 所示的纹理可以生成如图 6 左边两幅图片所示的绘制效果。这种纹理坐标获取方法的优点在于可以比较直观的控制笔画风格,在 OPENGL 多重纹理机制的支持下,还可以对不同的笔画采用不同的纹理进行映射。

2.2 基于径向曲率的纹理坐标计算

当需要绘制具有笔画明暗效果的风格化图片(如图 1 和图 6 右图所示)时,采用基于径向曲率的纹理坐标控制方法。计算每个顶点的径向曲率,并将所有径向曲率的值归一化至[0,1] 区间内作为纹理坐标进行映射。图 1 和图 6 的右图即是由该纹理坐标计算策略采用如图 7 所示的纹理进行映射生成的风格化绘制效果。该方法的优点在于纹理坐标计算量小(因为在前面的计算中已经得到径向曲率),缺点是对笔画风格的控制不够灵活和直观。

3 实验结果

图 4 右图显示了采用文献[10] 提出的纹理映射方法绘制的风格化效果,与图 1 相比,本文提供的绘制结果表现出了三维模型更多的表面特征。在奔四 2.4G,512M 内存,Geforce4mx440 显卡的实验环境下,本文提出的特征笔画分割提取的时间和绘制帧速率如表 1 所示。在对笔画进行处理时,本文提出的方法在绘制三角形数量为 100k 的三维模型时基本可以达到实时浏览的效果(约 15fps),并且表现了更多的模型表面特征信息。

4 结论

本文提出了一种三维模型风格化效果生成算法,能够较好的表达三维模型的表面特征。该方法

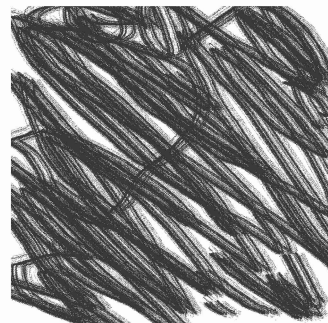
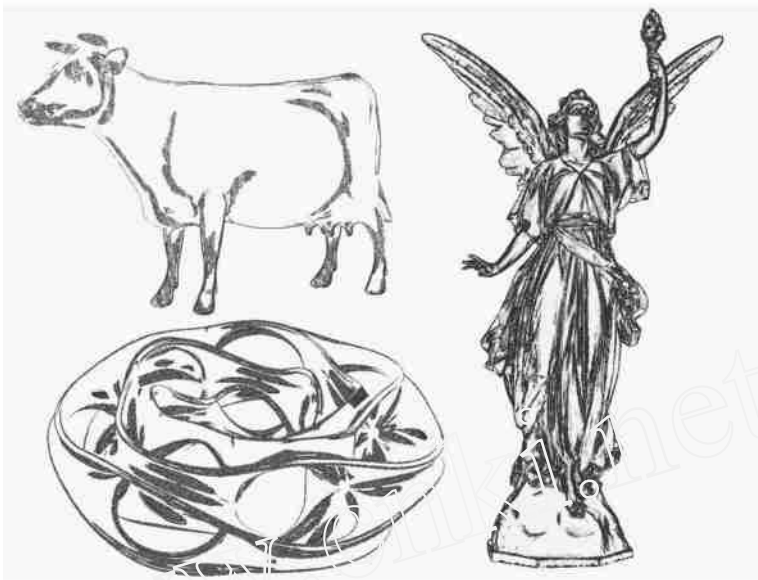


图 5 绘制图 6 中的左上和左下图像采用的纹理
Fig 5 Texture used by left top and left bottom images of Fig . 6



基于屏幕坐标映射 基于径向曲率

图 6 风格化绘制效果
Fig 6 Stylized rendering result

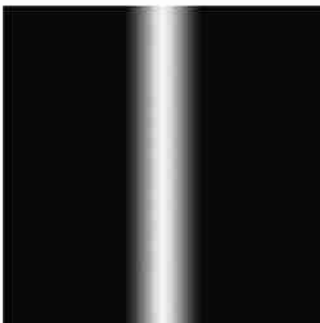


图 7 绘制图 1 和图 6 右边图像效果采用的纹理
Fig 7 Texture used by left image of Fig . 1 and left image of Fig . 6

表 1 本文使用的模型的特征笔画提取时间和绘制帧速率
Table1 Feature strokes extraction time and rendering speed of models in this paper

模型	三角形数量	特征笔画提取时间/ms	绘制帧速率/tps
Cow(图 1 和 6 左上图)	100 k	50	约 15
Heptoroid(图 6 左下图)	573 k	540	约 1
Lucy(图 6 右图)	525 k	400	约 1.5

首先定义了基于顶点径向曲率的能量函数,采用能量最小化的 GraphCuts 算法将三维模型表面的特征顶点和非特征顶点进行分割,连接特征顶点即构成三维模型的特征笔画。特征笔画能够较好的描述模型的表面特征。

本文采用对提取的特征笔画进行纹理映射的方

法实现多种风格化绘制效果,通过将特征笔画的三维坐标映射到屏幕坐标上计算纹理坐标并映射可以直观的控制笔画的风格,甚至可以对同一个模型的不同笔画采用不同的笔画风格进行映射。而通过特征顶点的径向曲率计算纹理坐标并进行映射的方法可以达到笔画明暗变化的风格化绘制效果。本文提出的风格化绘制方法对于三角形数量为 100k 左右的三维模型,基本可以达到实时绘制浏览的效果。

本文提出的方法计算快速并具有通用性,适用于各种复杂的三维模型,提取的特征笔画能够很好的表现模型的表面特征,对笔画风格的控制也较为容易。

参考文献

[1] Markosian L, Kowalski M A, Trychin S J, et al. Real-time nonphotorealistic rendering // SIGGRAPH 97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 1997: 415-420

[2] Northrup J D, Markosian L. Artistic silhouette: A hybrid approach // Proceedings of the 1st international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, Annecy, France, 2000: 31-38

[3] Raskar R, Cohen M. Image precision silhouette edges // I3D 99: Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics, Atlanta, Georgia, USA, 1999, 135-140

[4] DeCarlo D, Finkelstein A, Rusinkiewicz S, et al.

- Suggestive contours for conveying shape. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22 (3) : 848 - 855
- [5] Sousa MC, Prusinkiewicz P. A few good lines: Suggestive drawing of 3D models. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22 (3) : 381 - 390
- [6] Ohtake Y, Belyaev A. Automatic detection of geodesic ridges and ravines on polygonal surfaces. *The Journal of Three Dimensional Images*, 2001, 15 (1) : 127 - 132
- [7] Ohtake Y, Belyaev A. Ridge - valley lines on meshes via implicit surface fitting // *Proceedings of SIGGRAPH 2004*. Los Angeles, California, 2004: 609 - 612
- [8] Kalnins RD, Markosian L, Meier BJ, et al. WYSIWYG NPR: Drawing strokes directly on 3D models. *ACM Transaction on Graphics*, 2002, 21 (3) : 755 - 762
- [9] Boykov YY, Kolmogorov V. An experimental comparison of min cut/max flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAM)*, 2004, 26 (9) : 1124 - 1137
- [10] Lake A, Marshall C, Harris M, et al. Stylized rendering techniques for scalable real - time 3D animation // *Proceedings of the 1st international symposium on Non - photorealistic animation and rendering*, Annecy, France, 2000
- [11] Chan C, Akleman E, Chen J. Two methods for creating chinese painting // *Proceeding of Pacific Graphics*. Washington: IEEE Computer Society, 2002: 13 - 20
- [12] Boykov YY, Jolly MP. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in n - dim images // *Proceedings 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001: 105 - 112
- [13] Kwatra V, Schodl A, Essal, et al. Graph cut textures: Image and video synthesis using graph cuts. *ACM Transaction on Graphics (TOG)*, 2003, 22 (3) : 277 - 286
- [14] Strassman S. Hairy brushes. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, 20 (4) : 225 - 232
- [15] Nelson S, Chu H, Tai CL. Moxi: real - time ink dispersion in absorbent paper // *SIGGRAPH 05: ACM SIGGRAPH 2005*. New York, NY, USA, 2005: 504 - 511
- [16] Jing Hao, Zhou Bingfeng. A 3D model feature - line extraction method using mesh sharpening // *Proceeding of Edutainment*. Berlin: Springer, 2006: 840 - 848

* * * * *

简 讯

北京大学化学与分子工程学院在仿生材料合成领域取得新进展

利用仿生合成原理来构筑具有多级有序结构的仿生材料近年来受到人们的广泛关注,而具有三维有序图案化结构的无机单晶的可控制备一直是人们面临的一项挑战。齐利民教授研究组最近利用胶体晶体模板法成功制备了具有三维有序纳米孔洞结构的碳酸钙单晶。该合成方法借鉴了自然界生物矿化过程中从无定形碳酸钙到方解石型碳酸钙晶体的转化过程,为三维有序纳米图案化的新型无机单晶材料的可控制备提供了一条行之有效的仿生合成途径。相关结果以 VIP 的形式在 *Angew. Chem. Int. Ed.* 杂志发表(2008, 47, 2388)。该杂志还在同一期配发了一篇题目为“经由无定形前体的具有复杂形态的单晶”的点评对该工作予以了高度评价。

(摘自北京大学科学研究部主页 2008-06-25)