

基于 NPR 的 3 维模型线绘算法

徐从富 陈健松 潘云鹤

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027) (浙江大学人工智能研究所, 杭州 310027)

摘要 为更好地进行 3 维模型的线绘, 介绍了一个基于非真实感绘制技术的三角网格模型的线绘算法。该算法在预处理阶段利用离散化的曲率计算方法来估计模型顶点的平均曲率; 在交互阶段, 首先根据用户提供的平均曲率阈值检测模型的凹区域, 同时通过设计启发式搜索算法来提取该区域适宜的线条, 然后结合计算即可得到模型轮廓线, 并在绘制时考虑虚拟光照效果, 绘制结果表明, 可以得到较满意的结果。

关键词 非真实感绘制 3 维模型 平均曲率 凹区域 线绘

中图分类号: TP391.72 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)04-0707-06

A Line-style Drawing Algorithm for 3D Models

XU Cong-fu, CHEN Jian-song, PAN Yun-he

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Institute of Artificial Intelligence, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract An algorithm was introduced to generate line-style drawings of 3D triangle meshes. In the preprocessing stage, mean curvatures of vertices were estimated. At runtime, through interaction with user, concave regions under consideration were detected and skeletons of them were extracted using a heuristic searching method. Combining skeletons with contours and adding illumination effects shapes can be illustrated with a hand-made appearance. Experimental results validate the algorithm.

Keywords non-photorealistic rendering, 3D model, mean curvature, concave regions, line drawing

1 引言

近年来,随着学科本身的不断发展成熟以及计算机硬件的日新月异,图形学一步步向其预先设定的目标(即真实感 photo-realistic)前进。新近的光线跟踪及辐射度方法又为这领域添砖加瓦,其用真实感绘制技术生成的图像已经很难与真实的照片区分开来。但是,笔者也注意到真实感图形学并不能满足人们的所有需求,有时候它并不是传达信息最有效的手段,例如维修装配手册中的示意图、文学作品中的插图等等,无一例外都是手绘的作品,而不是来自真实的照片。这些平绘作品除了给予观者美的享

受、精神上的愉悦之外,手绘的作品由于省略了无关的细节,集中传达有效信息,因而让人更容易接受和理解,这一点得到很多认知及教育心理学家的支持^[1]。正因为以上特点以及其他种种优点,非真实感绘制技术(non-photorealistic rendering, NPR)已引起越来越多研究者的关注,在短短十几年时间得到了快速发展。

NPR 重要的一支是基于 3 维模型的绘制,在这方面产生了一些较好的应用,如动画片的制作、CAD 工具中的插件等等。本文介绍了一个 3 维模型线绘算法,即根据输入的模型生成线条画。这里把输入限定为三角形网格模型,因为其适用范围很广,包括一般用 CAD 软件构造的模型和 3 维扫描仪得到的

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60533090);国家自然科学基金项目(60402010)

收稿日期:2005-10-14;改回日期:2006-02-27

第一作者简介:徐从富(1969 ~),男,博士,副教授。主要研究方向为智能 CAD、人工智能、数据融合、数据挖掘等。E-mail: xucongfu@

数据等。非真实感绘制一般的步骤就是对输入的数据进行预处理,先提取适宜的信息,然后按规定的风格渲染出来。按这个过程,本文对 3 维模型线绘制技术进行论述。

2 相关工作

基于 3 维模型的非真实感绘制,已有不少文献报道。文献[2,3]等基于 3 维模型生成的图像,对模型进行非真实感的绘制。文献[4~6]对 3 维模型的轮廓边检测、绘制、消隐做出了重要的贡献,文献[7]对用户界面及用户工具集的设计令人耳目一新,但它们都没有把 3 维模型背后曲面的内蕴性质作为提取特征线的基础,并与轮廓线提高到同等的地位。参考相关学科的工作,笔者认为,凹区域是观察者把握物体形状的重要依据,因此,在此基础上给出了一个比较直观、自然的 3 维模型线绘方法。

3 特征线分类

特征线的提取在整个 3 维模型绘制过程中起到举足轻重的作用,它不仅为后面的渲染提供素材,而且其提取的精确程度也直接影响到最后成像的质量。这里把特征线主要分为以下两类:

(1) 外部特征线,即轮廓线。对三角网格模型来说,它是邻接可见三角面片和不可见三角面片边的集合,而且轮廓线的判断与当前视点位置相关。

(2) 内部特征线,包括位于凹区域和凸区域的特征线。对三角网格模型来说,即对应的邻接顶点都位于凹区域或凸区域边的集合中。内部特征线是模型的内蕴性质,与当前视点位置无关。

4 轮廓线提取

轮廓线(contour)是曲面上法线与视线相垂直的点的集合(如图 1 所示),即 $n_i \cdot (v_i - c) = 0$,其中 v_i 为曲面上的一点, n_i 是对应该点的法线, c 是视点的位置。

如前所述,三角网格模型就对应着相对当前视点邻接可见三角面片与不可见三角面片边的集合。轮廓线提取已经出现很多算法^[8],本文使用遍历的方法提取轮廓线。但是通过简单地遍历模型提取的轮廓线在质量上还不能令人满意,其不仅在精度上

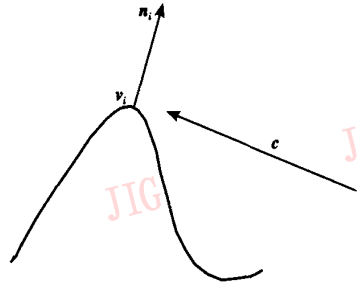


图 1 轮廓线定义

Fig. 1 Definition of contours

与根据光滑曲面得到的轮廓线有较大距离,而且会产生拓扑上的错误。这里利用文献[8]提出的线性插值方法加以改进,即计算三角面片上每个顶点的法线与视线的内积 d_i ,其计算公式为

$$d_i = \frac{n_i \cdot (v_i - c)}{\|n_i\| \|v_i - c\|}$$

如果 3 个结果符号不一致,则该三角面片上必有轮廓线经过,而对符号不一致的两个顶点可进行如下线性插值。

$$\hat{v} = \frac{|d_j|}{|d_i| + |d_j|} v_i + \frac{|d_i|}{|d_i| + |d_j|} v_j$$

这样不仅与 \hat{v} 对应的法线与视线的内积为 0,而且插值点的连线更好地逼近了精确的轮廓线(如图 2 所示)。

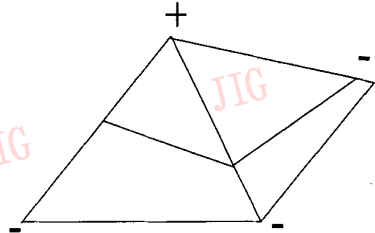


图 2 线性插值法提取轮廓线

Fig. 2 Extracting contours by linear interpolation

5 内部特征线提取

5.1 曲率的数学定义

由微分几何知识可得

$$W(dc) = -dn$$

其中, W 为曲面在点 P 的 Weingarten 映射, dc 为该点的任意切方向, dn 为沿该方向的法向量变化。Weingarten 映射的特征方向称为曲面在点 P 的主方

向,曲面沿主方向的法曲率(即对应的 Weingarten 映射的特征值)称为曲面在该点的主曲率。在表面上的每一点总是存在两个彼此正交的特征方向 r_1, r_2 , 其对应的主曲率是 k_1, k_2 。 $H = (k_1 + k_2)/2$ 称为曲面的平均曲率, $K = k_1 k_2$ 称为曲面的 Gauss 曲率。

5.2 曲率的离散化估计

推广到离散化的三角网格模型,本文采用如下方法,即先计算三角面片的 Weingarten 映射 W_f (下角 f 代表三角面片)。对三角面片,则规定顶点 v_1, v_2, v_3 及其相应的法向量 n_1, n_2, n_3 和有向边 e_1, e_2, e_3 以及标准正交基 (u, v) 如图 3 所示。

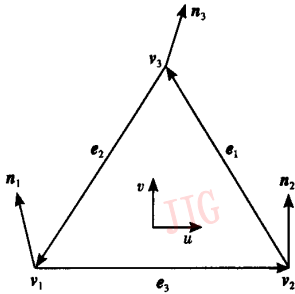


图 3 曲率的离散化计算

Fig. 3 Computing curvatures using discrete method

对边 e_1 来说, $W_f e_1 = n_3 - n_2$ (dn 项符号的选取表示对外法向的曲面,其凸区域的曲率为正), 即

$$w_{u,u} e_{1,u} + w_{u,v} e_{1,v} = (n_3 - n_2)_u$$

$$w_{u,v} e_{1,u} + w_{v,v} e_{1,v} = (n_3 - n_2)_v$$

推导得

$$\begin{pmatrix} e_{1,u} & e_{1,v} & 0 \\ 0 & e_{1,u} & e_{1,v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{u,u} \\ w_{u,v} \\ w_{v,v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (n_3 - n_2)_u \\ (n_3 - n_2)_v \end{pmatrix}$$

对边 e_2, e_3 重复类似操作,可得到有关 W_f 分量 W 的

超定线性方程组,再通过最小二乘法可解得 W_f 。对任意顶点,先计算其所有相邻面片的 W_f ,再通过变换、加权平均来得到该顶点的 W ,然后就可以计算得到其主方向和主曲率。详细的介绍可参见文献[9]。

5.3 特征区域检测

平均曲率规定了曲面的凹凸区域,在严格凹区域, $H < 0$; 反之,在严格凸区域, $H > 0$ 。在这里应特别关注凹区域。注意到,在线描创作中,凹区域是艺术家重点刻画的区域。而在一系列关于形状变化探测的实验中,通过对比相同尺度的凹区域和凸区域变化可见,受实验者对凹区域的变化更为敏感^[10]。由于平均曲率内蕴的性质与视点无关,因此对一个具体模型来说,每个顶点的平均曲率只需在预处理阶段计算一次即可。图 4 是一个典型的平均曲率分布。

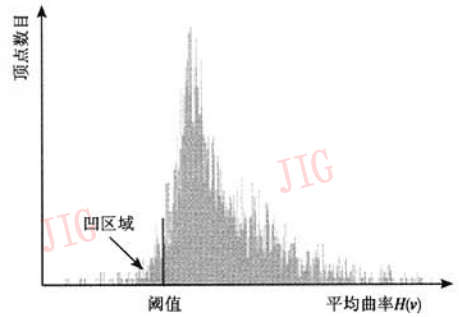


图 4 平均曲率的典型分布

Fig. 4 Typical distribution of average curvatures

在交互过程中,对用户给定的临界阈值,当扫描模型的每个面片时,如果一条边的两个邻接顶点都位于临界区域内,则标记该边属于特征区域。如图 5 所示,深色区块代表特征区域。

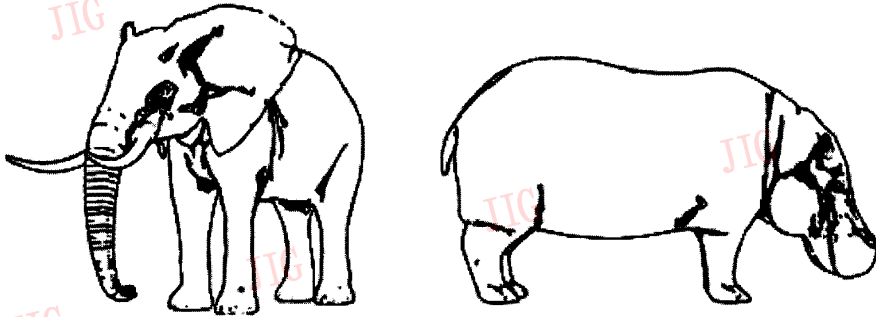


图 5 特征区域(平均曲率 H 阈值为 -0.01)

Fig. 5 Characteristic regions

5.4 内部特征线提取

由于 5.3 节计算得到的特征区域,需要进一步细化,使其符合线绘的特点。为此本文设计了一个启发式的搜索算法。

对用户给定的平均曲率阈值,可将得到的特征区域记为 S 。对所有顶点 $v_i \in S$,按照平均曲率从小到大的顺序(对应凹区域,即凹陷程度从高到低)排序,并进行如下操作:

Extract-Feature-Lines(S)

```

1 for 所有顶点  $v_i \in S$  do
2   if visited[ $v_i$ ] = true
3     then continue
4   else Build-Chain( $v_i$ )
5   Render-Chain()
```

Build-Chain(v_i)

```

1 Add-to-Chain( $v_i$ ), visited[ $v_i$ ] = true
2 扫描  $v_i$  所有邻接点,得到  $v_{cur} \in S$ , 满足其在所有
  未访问的邻接点中平均曲率  $H$  的绝对值最大
3 if  $v_{cur}$  不存在
4   return
5 Add-to-Chain( $v_{cur}$ ), visited[ $v_{cur}$ ] = true
6  $v_{prev} = v_i, v_2 = v_{cur}$ 
7 for (;;) do
8 扫描  $v_{cur}$  所有未访问的邻接点,得到  $v_{next} \in S$ ,
  需使路径( $v_{prev}, v_{cur}, v_{next}$ )最为光滑,且大于用户
  指定的最低光滑度
9 if  $v_{next}$  不存在
10  then break
11 else
    visited[ $v_{next}$ ] = true,
    Add-to-Chain( $v_{next}$ ),
     $v_{prev} = v_{cur}, v_{cur} = v_{next}$ ,
    continue
12  $v_{prev} = v_2, v_{cur} = v_i$ 
13 for (;;) do
14 扫描  $v_{cur}$  所有未访问的邻接点,得到  $v_{next} \in S$ ,
  使路径( $v_{prev}, v_{cur}, v_{next}$ )最为光滑,且大于用户
  指定的最低光滑度
15 if  $v_{next}$  不存在
16  then break
17 else
    visited[ $v_{next}$ ] = true,
    Insert-to-Chain( $v_{next}$ ),
```

$v_{prev} = v_{cur}, v_{cur} = v_{next}$,

continue

在 Build-Chain 函数中, Add-to-Chain 指从路径链后面添加顶点, Insert-to-Chain 从前面插入顶点, 代码 7-11 从一个方向搜索路径, 13-17 从相反方向搜索路径。光滑度用向量 $\overrightarrow{v_{cur}v_{prev}}$ 和 $\overrightarrow{v_{cur}v_{next}}$ 之间的夹角来衡量, 用户可以指定最小夹角, 这样得到的特征线路径就断在线条转换方向的地方。用户可以指定最短路径阈值, 以避免画面中出现太多短碎的线条。

6 绘制及结果

本文算法已在 VC + OpenGL 平台上实现, 消隐策略采用传统的 Z-buffer 技术。这是一个 2-pass 的过程, 即首先选择多边形填充模式绘制 3 维模型, 并利用多边形偏移函数增加其深度值; 然后用背景色渲染, 再在其上绘制计算得到的特征线。基于 Z-buffer, 虽然该方法比较简单, 但在一定程度上也限制了对线条更细致的建模, 更复杂的消隐方法可参见文献[4]~[6]。

文献[11]指出, 一个立体的对象, 有受光的一边和阴影的一边, 因为它面上有受光强弱的不同, 所以特征线条随之有深淡不同的变化。受此启发, 可假想一个虚拟光源, 根据特征线的受光不同, 其亮度有明暗变化。对轮廓线, 在对顶点进行线性插值的同时, 可对顶点的法线也做同样的操作, 即可得到插值后的法线 \hat{n} 。这样就得到了特征线上全部顶点的法线, 根据法线与光线的夹角, 就大致可以判定受光情况, 然后合理地设定 OpenGL 混合功能中的 Alpha 值, 就可以得到需要的绘制效果。同时由于外部特征线具有重要意义, 因此在设定时可增加一个轮廓线附加值, 以保证其明晰可见。

另外, 通过 B 样条曲线插值也可得到光滑的特征线, 并且用多边形来模拟丰富的笔触, 也可以得到更好的绘制效果。目前, 这些方法还没有在系统里实现。

图 6~图 8 是用本文算法绘制得到的一些结果图。图 6 大象模型的三角面片数为 39 290, 交互参数设置平均曲率 H 的阈值为 -0.01、最短路径长度为 2、最小光滑度为 120, 图 6(d) 增加了光照效果。图 7 河马模型的三角面片数为 46 202, 交互参数设置平均曲率 H 的阈值为 -0.02、最短路径长度为 2、

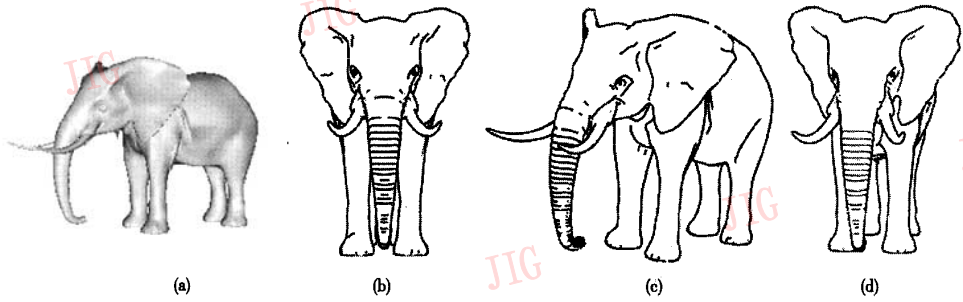


图6 大象模型绘制结果

Fig.6 Rendering results of elephant model

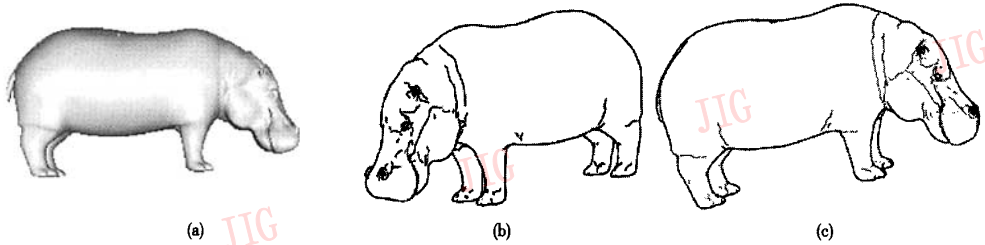


图7 河马模型绘制结果

Fig.7 Rendering results of hippo model

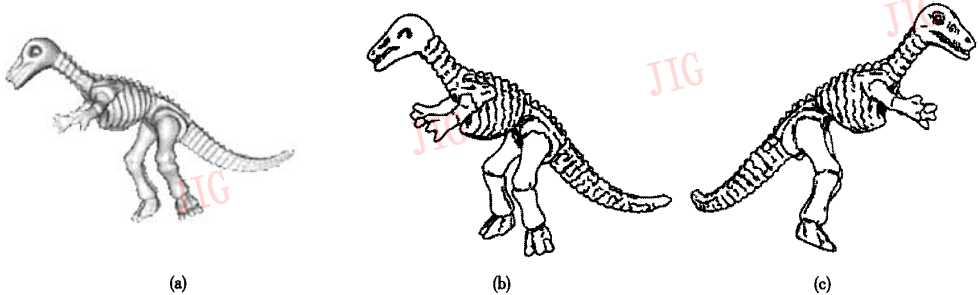


图8 恐龙模型绘制结果

Fig.8 Rendering results of dinosaur method

最小光滑度为 120,图 7(c)增加了光照效果。图 8 恐龙模型的三角面片数为 112 384,图 8(b)的交互参数设置:平均曲率 H 的阈值为 -0.1 、最短路径长度为 5、最小光滑度为 105,图 8(c)的交互参数设置:平均曲率 H 的阈值为 -0.1 、最短路径长度为 4、最小光滑度为 110,图 8(c)也增加了光照效果。

7 结 论

当前,图形学越来越重视人在感知、理解图像方面的能动性,NPR 的发展就是这种趋势的明证。

本文给出了一个 3 维模型的线绘算法,希望按照艺术家的思维设计绘制过程,以便表现人感知的

特点。实验结果表明,在一定程度上达到了上述目的。但本文方法还存在一些不足,具体表现在:线条风格比较单调、表达方式也较欠缺,比如素描中常用的阴影线是表现物体受光、材质的重要工具,而本算法没有论及。另外,绘制效果,尤其是内部特征线与 3 维模型面片的密集程度有较大的关系。鉴此,进一步的研究工作主要有:

(1) 对多种渲染风格的支持,如铅笔画、国画、点画等,以满足实际需要;

(2) 科学与艺术结合的探索,如图形学、美学、心理学和传达艺术的交叉研究等;

(3) 动画层次上的研究,因这将对未来的发展开辟广阔的天地;

(4) 用户界面的设计, 以便于艺术家创作。

致谢 本文实验用的大象模型、河马模型由 Espona 提供, 恐龙模型由 Cyberware 提供。

参考文献 (References)

- 1 Arnheim R. Art And Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye[M]. Berkeley And Los Angeles, CA, USA: University of California Press, 1964.
- 2 Takafumi S, Tokiichiro T. Comprehensible rendering of 3-D shapes [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH '90 [C], Dallas TX, USA, 1990: 197 ~ 206.
- 3 ROSSL C, KOBELT L. Line-art rendering of 3D models[A]. In: Proceedings of 8th IEEE Pacific Conference on Computer Graphics and Applications[C], Hong Kong, 2000: 87 ~ 96.
- 4 Markosian L, Kowalski M A, Trychin S J, et al. Real-time nonphotorealistic rendering [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH '97[C]. Los Angeles, CA, USA, 1997: 415 ~ 420.
- 5 Aaron Hertzmann, Denis Zorin. Illustrating smooth surfaces[A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH ' 2000 [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 517 ~ 526.
- 6 Northrup J D, Markosian L. Artistic silhouettes: A hybrid approach [A]. In: Proceedings of ACM, First International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering[C]. Annecy, France, 2000: 31 ~ 37.
- 7 Kalnins R D, Markosian L, Meier B J, et al. WYSIWYG NPR: Drawing strokes directly on 3D models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 755 ~ 762.
- 8 Hertzmann A. Introduction to 3D non-photorealistic rendering: silhouettes and outlines[A]. In: ACM SIGGRAPH '99 Course Notes [C], Los Angeles, CA, USA, 1999.
- 9 Szymon Rusinkiewicz. Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes [A]. In: Proceedings of IEEE Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission[C], Thessaloniki Greece, 2004: 486 ~ 493.
- 10 Barenholtz E, Cohen E, Feldman J, et al. Detection of change in shape: An advantage for concavities[J]. Cognition, 2003, 89(1): 1 ~ 9.
- 11 Zhou Fang-bai. Practical Issues of Sketch[M]. Shanghai: Shanghai People Art Press, 1957. [周方白. 素描实践讲话[M]. 上海: 上海人民美术出版社, 1957.]