

基于轮廓线的非真实感绘制技术

范 华, 秦茂玲

(山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014)

摘 要:从 NPR 技术的形成和特点出发,详细论述了 NPR 中轮廓线的检测和绘制技术等问题。轮廓线在 NPR 中占有重要地位,它的表现不仅关系到 NPR 最终效果的好坏,而且也是实时绘制中一个提高速度的关键。重点介绍了 NPR 中流行的和最新的轮廓线检测与绘制技术,并对这些算法和技术进行了分类与分析,总结了其优缺点和适用场景。

关键词:非真实感绘制;轮廓线检测;轮廓线的风格化绘制

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)10-0237-05

Non-Photorealistic Rendering Techniques Based on Silhouette

FAN Hua, QIN Mao-ling

(School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: In this paper describe the research process in NPR. Silhouette plays a critical role in NPR. NPR effect greatly depends on the silhouette performance. And it's also a key technology for speedup in real-time NPR. This paper introduces the most popular and latest techniques in silhouette detection and rendering. And classify and analyze them. After analyzing the advantage and disadvantage of them, the working context of them is also concluded.

Key words: non-photorealistic rendering; silhouettes detection; stylized silhouette rendering

1 概念介绍

1.1 非真实感绘制技术的形成

真实感图形学近年来已达到了所追求的“像照片一样真实的效果”,它暗示着精确性和完美性,强调模拟场景对于现实世界的保真度。但当从传递视觉信息的角度来看照片的实际作用时就会发现,这些具有真实感的图像并不是提供视觉信息的最好选择^[1]。如医学插图、工程插图、考古插图、草图、线条画等往往比拍摄的照片具有更多的优点。

自1997年的SIGGRAPH会议开始讨论和传统的真实感图形绘制(Photorealistic Rendering, PR)相对的艺术的另一种表现形式,即非真实感绘制(Non-Photorealistic Rendering, NPR)。

之后, NPR 技术在计算机图形学的发展史上逐渐成为一个重要的新兴领域。NPR 是指利用计算机生成不具有照片般真实感,而具有手绘风格的图形的技

术。其目标不在于图形的真实性,而主要在于表现图形的艺术特质、模拟艺术作品,它更关注于图形个性化和艺术化的表达^[2],如水墨画、水彩画和线条画等。

1.2 轮廓线在 NPR 技术中的作用

在三维场景的 NPR 中,轮廓线在视觉效果方面扮演着重要的角色,对于三维物体的感知和审美都是必需的。它是三维模型的重要特征,刻画了模型大致的轮廓和形状,展现了三维模型的基本外观。艺术家因此经常通过显式地加强绘制轮廓线,或通过简化某些不是非常关键的局部细节来表达设计者的设计意图^[3]。

由于轮廓线是三维模型的一种特征值,其形式简洁,而内涵丰富,因此根据轮廓线就可以识别出对象的三维结构^[4]。另外,由于轮廓线在图形交流中所起的巨大作用,因此这一技术在科学可视化、三维场景的快速绘制等有着广阔的应用前景。

根据产生的机理不同,轮廓线可分为以下5类^[5]:

(1)物体轮廓线:是指由朝前面和朝后面的公共边形成的轮廓线,包含物体的边缘和内部不连续。

(2)锐边:当该边两个相邻面之间夹角 α 小于某个阈值时,其公共边称为锐边。

(3)凹边:当该边两个相邻面之间的夹角 α 大于某

收稿日期:2007-01-10

基金项目:国家自然科学基金(69975010, 60374054);山东省自然科学基金(Y2003G01, Z2004G02)

作者简介:范 华(1979-),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为图形图像处理、非真实感绘制技术;秦茂玲,副教授,硕士生导师,研究方向为数字水银技术、图形图像处理、非真实感绘制技术。

个阈值时,它们的公共边就称为凹边。

(4)边界:它是只有一个相邻面的边。

(5)材质边界轮廓线:可增强物体的 NPR 效果。

这五类基本囊括了在 NPR 中出现的轮廓线,其中第 2,3 类轮廓线也被统称为物体固有的特征线,是不随 viewpoint 的变化而变化的,只要可见就要绘制。

用计算机自动生成物体的轮廓线是 NPR 的核心技术。NPR 中轮廓线的检测技术主要有检测算法、可见性问题等^[5]。轮廓线检测算法负责找出三维物体的轮廓,包括物体的边缘和其本身固有的褶皱等。现有的轮廓线检测技术按照对象空间的不同可分为两类:图像空间的检测算法和图形空间的检测算法^[2]。

2 轮廓线的检测算法

轮廓线在 NPR 中具有简单而有效的作用,寥寥数笔即可表达足够的视觉信息,所以针对轮廓线绘制研究一直是 NPR 领域的热点。

Gooch 等^[6]提出的轮廓线检测硬件算法是基于物体的多面体模型。在此算法基础上为得到较宽的轮廓,他做了进一步修改,提出了两步算法:分别在第 2,3 步中利用 Polygon Offset 扩展函数,根据三角形斜率和偏移因子调整深度值,光栅化后就得到较宽的轮廓。但当深度有较大不连续时,只有部分线段能被绘制。

后来,Gooch 又采用高斯映射方法,具体算法为:先把球表示成八面体或二十面体,后继层对前一层中每个球面三角形四等分,最后把弧保存在最底层的球面三角形中。但随着球面的不断细分,对于一定长度的弧,不能保证球面三角形完整地包含这段弧。为了解决此问题,他提出了多层次分割思想,每个球面三角形不一定面积相等,每段弧保存在能包含它的面积最小的球面三角形中。分割完后,采用 Zhang^[7]的处理方法,预先找出与视平面相交的球面三角形,然后根据弧所在的球面三角形,快速找出与视平面相交的弧。

Gooch 的算法需要对所有的边检测,利用特殊的层次结构,其算法复杂度为 $O(\log n)$,该算法对正平行投影适用,但对透视投影则不适用。

另外,Markosian 等^[8]提出了一种实时性较好的算法,通过牺牲精度和细节来提高绘制速度。该算法通过离散检查较少数量的边得到部分轮廓边后,利用连通性找出所有的轮廓线。这一算法尽管减少了需检查的边数,但其判断轮廓边的方法仍需进行耗时的浮点乘运算。并且该算法并不能保证很快搜索到部分轮廓边。

由于模型轮廓线是和视点相关的,所以当模型位

置发生改变时都要重新计算一遍,这将占用系统很大的开销。Markosian 认为只要有选择地绘制轮廓线和用户指定的特征线就可以表现出大量的信息。为了达到交互绘制轮廓线速度的要求,不绘制所有轮廓线而以一定的概率绘制其中的大部分。此算法适用于相邻信息已知的和静止多面体模型,不需要遍历整个场景,轮廓线绘制速度快,比判别每条边的算法快 5 倍,甚至比模型本身的绘制速度更快。利用连续性,沿着相邻轮廓边找到整个轮廓,由于轮廓边是单独标识,所以可以用多种风格绘制两个顶点之间的线段。

2.1 图像空间的轮廓线检测算法

在图像空间中检测轮廓线是一种简单而高效的方法,它通过处理已绘制的基于观察者视点的场景图像,在图像缓存中检测物体的边缘轮廓线和其他轮廓线。虽然这个方法受到图像精度的影响,但是可以满足一般的应用。

最直接的检测方法是利用颜色缓存从三维场景绘制得到的图像缓存中根据颜色的不连续检测物体的轮廓。这个做法显然存在严重的不足,检测不仅受到图像分辨率的限制,而且由于纹理贴图等原因,通过检测得到的结果往往存在非表现物体轮廓的多余线。由于绘制的原因,互相覆盖而且颜色相同的两个物体之间将检测不到轮廓线。

目前比较有效的方法是利用三维场景的信息,采用特殊的绘制手段得到比较特殊的绘制图像,在这些绘制结果中检测物体的轮廓线。其流行的技术可分为以下两类:

第一类方法是分别在深度映像和向量映像中检测物体的轮廓线,再结合两者得到的结果,最后得到的效果令人满意。

深度映像方法是通过分析深度的不连续性来检测面的不连续性。文献^[9,10]都提出了类似的算法。其做法是对深度映像的每一个点计算深度的变化梯度,把变化大的标记为轮廓线上的点^[9]。如果两个相互层叠的物体处在同一个深度,这个算法检测不到两个物体相交的那个边界。它仅仅检测 C0 类型的不连续,而且也不能找到第 2,3 类轮廓线^[10]。

向量映像法是 Decaudin 提出的一种简单有效的改进深度映像不足的方法^[10],它可以检测到 C1 类型的不连续。得到向量映像的新方法是利用最新的显卡可编程硬件技术,通过高级着色语言编写的像素着色器直接可以得到每一点的法向量。Mitchell^[11]提出了一种利用基于像素着色器来检测轮廓线的方法。通过结合深度映像和向量映像的结果,可以得到满意的最终结果。这类方法复杂度仅与像素的多少有关,而和多边

形的多少无关,所以绘制检测时间基本是固定的,速度相当快,能满足实时应用的需要。但其无法解决没有深度变化和向量变化的情况。

第二类方法利用硬件的绘制技术来实现,通过对三维场景的多遍绘制达到轮廓加强的效果。文献[12, 13]提出的方法具有代表性,它们基于环境映射和镂空缓存。文献[13]提出的具有图像精度的轮廓线绘制方法效果更好。此方法的局限是只能找到第 1 类轮廓线,不能找到物体内部的第 2, 3 类轮廓线。虽然也可控制轮廓线的粗细,但不是很灵活。

在图像空间中检测轮廓线的方法快速高效,可利用硬件直接得到各种缓存,轮廓线可见与隐藏问题通过硬件解决,复杂度和模型的复杂度无关,所以在实时交互应用中也有很好的表现,而且简单,易于实现,所以适合普通的实时应用。但这类方法由于丢失了三维的信息,不能再重建三维信息,对于检测得到的轮廓线,因为是像素形式存在,而不是几何形式的描述,用户能控制的属性很少,要想做到重建笔画和多风格绘制轮廓线难度很大。当然,也有人尝试在像素基础上重建笔画,但效果并不理想,而且很慢,不能用于实时应用。

2.2 图形空间的轮廓线检测算法

目前众多研究者提出的轮廓线绘制算法根据不同的轮廓线定义主要分为两类:一类基于多边形网格;另一类基于光滑表面。其轮廓线检测算法也分为以下两类:

1) 基于多边形面片描述物体的轮廓线检测算法。

对于由多边形面片描述的模型,其轮廓线由多边形面片的一部分边组成。轮廓线的定义包括上面讲到的五类轮廓线。检测轮廓线的算法可分为直接检测算法和间接合成算法。这些算法在文献[8, 12~15]中都有描述。

(1) 直接检测算法。

最简单的算法是基于边的遍历检测算法。开始人们采用的探测多边形模型轮廓线的一般方法是遍历组成模型的所有边,按照轮廓线的判断条件判断每一条边。此方法必须有每一条边的相邻信息,即它的两个相邻面的法向。而且每次观察者视点的坐标发生变动,必须重新计算所有的轮廓线。它显然效率低下,为了加速和在视点改变时减少运算,提出了基于预处理的改进算法。文献[12, 15]提出了通过高斯球来加速的改进算法,比重新计算所有边相邻面的点积的方法速度快。文献[15]在此基础上通过外加一个包围盒来加速相交的计算。

文献[16]提出了一种基于边缓存结构的算法。由

于视点变化时主要判断的是第 1 类轮廓线的变化,所以这个算法很实用,它对透视和投影模式都有效,几何信息只需要面的组成边,而不必知道边有哪些相邻面,速度上对于没有硬件加速的特殊情况可以极大提高检测效率。该算法虽然对封闭物体处理比较好,但对于不封闭的物体处理效果不理想。

总之,直接检测算法虽然简单有效,但有一个明显的缺点,需要在视点发生改变时,重新为每一帧检测多边形面片的每条边,可想而知这种做法是低效的。对于非交互式的静态绘制可不考虑速度的要求,但在实时交互中,速度也是一个相当重要的因素。通过预处理,减少为每一帧的计算量可达到不错的加速效果,但速度相对图像空间还是慢很多。因只有很小一部分边作为轮廓线被检测出来,遍历所有边的方法是低效和不必要的。

(2) 随机检测算法。

轮廓线有两个特性:一是不会存在单一的轮廓边,它一般有很多轮廓边连接而成;二是在视点位置发生很小变动时,上一帧中的轮廓线大部分都会出现在下一帧中。根据这两个特性文献[8]提出了一种实时 NPR 技术,在轮廓线方面牺牲了一定的精度和细节来提高绘制速度。此算法不仅适用于相邻信息已知的静止多面体模型,而且轮廓绘制速度快,因为利用了轮廓线的时空一致性,算法也同样适用于实时交互应用。由于轮廓边是单独标识,所以可用多种风格绘制轮廓线。比较文献[12]中的方法,这个方法易于实现,并且高效强壮。但它始终不能保证检测到所有的轮廓线。

2) 基于自由曲面描述物体的轮廓线检测算法。

自由曲面最常见的描述有两种:NURBS 和子分曲面,一般的应用中都多用多边形面片来近似表示光滑曲面。文献[14]提出了检测面片表示的光滑曲面的轮廓线的方法。此方法有一个问题,如果面片的单个多边形过大,轮廓线会很粗糙也会丢失,其改进方法是提高细分的阶数,减小单个多边形的大小,直到达到满意的效果。更有效的方法是只对有轮廓线的面片进行细分。由此可见,相对于图像空间的检测算法,图形空间检测得到的轮廓线是基于几何表述的,所以可对其施加多种风格绘制,包括控制轮廓线的线型粗细和绘制手法。图形空间的这些检测算法需要模型的几何信息,比如相邻关系等,对于模型信息的要求较高,并且处理速度虽然通过多种改进,但对于绘制大型的模型和场景仍是瓶颈。

3 轮廓线的风格化绘制技术

在 NPR 技术中,轮廓线是艺术风格造型的一个重

要组成部分,是描绘物体的一个较为自然的方式,它既可以提供一些边界位置信息,又可以为纹理和色调提供辅助的表现效果。当然,轮廓线不仅可以描绘物体的外部轮廓,还可以表示物体内部的许多重要细节,具有很强的表达能力。对于绘制风格来说,不同风格的绘制往往是轮廓线和色调的有机的不同组合。

轮廓线的风格化绘制一直是 NPR 中一种重要的艺术表现形式,轮廓线常常被用来作为风格化绘制场景的基本元素。其首先检测出三维物体的轮廓线,然后采用某种风格的笔画描画投影图中的这些轮廓线,就可以得到不同风格的艺术图案^[3]。

尽管通过纯图形空间的方法可以获得轮廓线的解析表示,但在轮廓线绘制时不可避免地要涉及到可见性判断问题,这是非常耗时的。一般需要通过光线跟踪方法来判别可见性问题,采用 Appel^[17]的方法将不能达到实时的要求,即使采用 Markosian 等人^[18]的改进方法也不能达到实时的要求。

最佳的轮廓线绘制方法是基于图像空间的,但纯粹图像空间的检测技术局限性很大。Raskar^[19]提出的背面前移技术可快速地实现轮廓线的绘制,但它对轮廓线粗细的控制非常不好,而且只能检测第 1 类轮廓线。

Markosian^[8]采用遍历方法来检测第 2,3 类轮廓线,要用到模型的几何信息如相邻面的法向,在视点发生改变时需要遍历计算,对实时性能造成影响。而且由于基于图像的轮廓线检测方法得到的轮廓线是像素级的轮廓线,它比较难应用于风格化绘制。所以单一采用一种轮廓线检测方法存在算法优点的同时不可避免地存在着应用上的局限性。

王翱宇^[2]在总结目前各种轮廓线检测技术优点的基础上提出的混合图像和图形空间的检测绘制算法,结合了最新的硬件加速技术,解决了轮廓线绘制的速度瓶颈,可达到实时的效果。其方法可较好地检测出轮廓线中最重要的物体轮廓线和内部特征线,对物体轮廓线采用背面线框绘制技术,绘制内部特征线时利用了显卡硬件提供的可编程顶点着色器。他的算法不仅减少了对模型几何信息的依赖,同时适用于动态的模型,利用顶点着色器减少了 CPU 的运算量,而且可交互控制轮廓线的粗细,从而得到更好的轮廓线绘制效果。

检测第 1 类轮廓线最简单的方法是计算每两个相邻面的向量和视线向量的点积,但视线向量经常会发生改变,所以采用这个方法的计算量很大。王翱宇^[2]采用背面线框绘制技术检测第 1 类轮廓线非常快,不需相关的几何信息且可见性问题通过 Z-buffer 解决,

但其不足在于对物体内部的特征刻画不够。

物体的特征轮廓线指上面讲到的第 2,3 类轮廓线,它们只和相邻面的夹角有关,由于快速计算夹角是一个非常大的计算量,虽然可以通过预处理计算模型中所有边的相邻面夹角,然后通过和阈值的比较建立特征边的集合,但其不能适合于动态改变模型信息的场景。而且由于不同的模型设置不同的夹角阈值产生的特征轮廓线效果不同,有时经常需要改变阈值的大小。为此,王翱宇^[2]采用 GPU 的顶点着色器来计算夹角,通过硬件来计算其相邻面的法向和视线的夹角,再给以不同的偏移量来绘制。采用这样的方法可比单纯采用背面线框技术得到的轮廓线有更好的效果,因顶点着色器处理技术在速度上非常快,完全可以满足实时的需要。

由上可见,轮廓线的风格化绘制(SSR)一直是 NPR 中重要的一种表现形式,可以模拟各种材质和绘制手法。通过绘制笔划中的抖动和在笔画纹理、宽度上的变化来体现一种手绘效果。SSR 大量的基本算法在 Durand^[20],Gooch^[12]中都有总结和描述,Masuch^[21]提出了显示地在三维模型上绘制风格化轮廓线的方法。尽管对风格化绘制轮廓线已经做了大量的工作,但在风格化绘制中的时间一致性却研究不多。Masuch^[21]给出了一种简单图形的解决方法,但它只能应用在轮廓线的弧长参数不变的情况。

同样,王翱宇^[5]在讨论目前轮廓线风格化绘制技术的基础上,提出了一种改进的基于图像空间笔画重建的轮廓线绘制技术。该算法的优点是采用 Stencil buffer 和顶点着色器处理,可得到效果更好的 ID 参考映像,在此图像基础上提取的笔画通过硬件已经解决了可见性问题,其比纯粹的图形空间笔画绘制方法省去了可见性判断,提高了速度,还解决了图像空间绘制方法无法得到笔画和进行风格化绘制的弱点。

基于硬件的轮廓线生成可得到更多效果更好的轮廓线,而不仅仅是第 1 类主要轮廓线。轮廓线通过混合方法生成,相比图形空间的轮廓线算法在精度上损失了一些,但在速度上大大提高。从二维像素级图像重建轮廓笔画解决了前面两个问题,因为得到的笔画都是二维的屏幕空间的笔画。而且这个方法不需要进行可见性判别,因为用硬件帮助解决了可见性问题。

4 结束语

文中针对近年来在图形学界兴起的基于轮廓线的非真实感绘制技术做了简要的综述。包括 NPR 的概念、特征等,并重点介绍了非真实感绘制中轮廓线的主要检测与绘制技术,详细讨论了主要的检测与绘制的

具体算法及其优缺点和其适用的环境。

参考文献:

- [1] 苏延辉, 韦 欢, 费广正, 等. 非真实感绘制技术研究[J]. 中国传媒大学学报: 自然科学版, 2006(13): 66 - 68.
- [2] 王翱宇. 非真实感渲染若干技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [3] 华才健. 非真实感绘制相关技术的研究与实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2005.
- [4] Perona P, Malik J. Scale - Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629 - 639.
- [5] 王翱宇, 唐 敏, 童若锋, 等. 非真实感绘制中轮廓线检测技术综述[J]. 计算机应用与软件, 2006(23): 102 - 104.
- [6] Gooch A, Gooch B. Using Non - photorealistic rendering to communicate shape[C]//in SIGGRAPH'99 Course Notes, Section8. Los Angeles: [s. n.], 1999.
- [7] Zhang H, Hoff K. Fast backface culling using normal masks [C]//In Ded C Z. 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics. Providence, Rhode Island: [s. n.], 1997: 103 - 106.
- [8] Markosian L, Kowalski M A, Goldstein D, et al. Real - time Non - Photorealistic Rendering[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1997: 415 - 420.
- [9] Saito T, Takahashi T. Comprehensible Rendering of 3D Shapes [C]//In proceedings of SIGGRAPH90. New York, NY, USA: ACM Press, 1990: 197 - 206.
- [10] Decaudin P. Cartoon - Looking Rendering of 3D - Scenes[R]. Technical Report 2919, INRIA: ACM Press, 1999.
- [11] Mitchell J L, Brennan C, Card D. Real - Time Image Space Outlining for Non - Photorealistic Rendering[C]//In ACM SIGGRAPH Conference Abstracts and Applications. New York, NY, USA: ACM Press, 2002.
- [12] Gooch B, Sloan P J, Gooch A, et al. Interactive Technical Illustration[C]//In proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics. Atlanta, Georgia, United States: [s. n.], 1999: 31 - 38.
- [13] Raskar R, Cohen M. Image Precision Silhouette Edges[C]//In proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics. Atlanta, Georgia, United States: [s. n.], 1999: 135 - 140.
- [14] Hertzmann A. Introduction to 3D Non - Photorealistic Rendering: Silhouettes and Outlines[C]//SIGGRAPH'99. New York, NY, USA: ACM Press, 1999.
- [15] Benichou F, Elber G. Output Sensitive Extraction of Silhouettes from Polygonal Geometry[C]//In Proceedings of the 7th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. New York, NY, USA: ACM Press, 1999: 60 - 69.
- [16] Buchanan J W, Sousa M C. The Edge Buffer: A Data Structure for Easy Silhouette Rendering[C]//In proceedings of the 1st International Symposium on Non - photorealistic Animation and Rendering. Annecy, France: [s. n.], 2000: 39 - 42.
- [17] Appel A. The Notion of Quantitative in visibility and the Machine Rendering of Solids[C]//Proceedings of the 1967 22nd National Conference. Washington, D. C, United States: [s. n.], 1967: 387 - 393.
- [18] Markosian L. Art - based Modeling and Rendering for Computer Graphics[D]. Brown: Brown University, 2000.
- [19] Raskar R. Hardware Support for Non - photorealistic Rendering[C]//In Proceedings of SIGGRAPH/Eurographics Workshop on Graphics Hardware. [s. l.]: ACM Press, 2001: 41 - 46.
- [20] Durand F. An invitation to discuss computer depiction[C]//Proceedings of the second international symposium on Non - photorealistic animation and rendering, NPAR2002. New York, USA: ACM Press, 2002: 111 - 124.
- [21] Masuch M, Schumann L, Schlechtweq S. Animating Frame - to - Frame Coherent Line Drawings for Illustrative Purposes [C]//In Proceedings of Simulation and Visualisierung, SCS Europe. [s. l.]: [s. n.], 1998: 101 - 112.

(上接第 236 页)

图像的三维显示效果比没有实行插值要平滑得多, 在进行了 4×4 放大之后, 也没有出现马赛克现象, 这说明算法是有效的。在显示二值图像或内容比较简单的图像的三维图像时, 往往不对其进行插值处理, 也能实现比较好的三维显示效果。

参考文献:

- [1] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 第 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [2] 和平鸽工作室. OpenGL 高级编程与可视化系统开发——高级工程篇 [M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] Dunlop R. Introduction to Catmull - Rom Splines[EB/OL]. 2002. <http://www.mvps.org/directx/articles/catmull/>.
- [4] 江巨浪, 张佑生. 一种基于 C^2 连续 Catmull - Rom 样条的图像放大方法[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(4): 386 - 388.
- [5] Woo M, Neider J, Davis T, et al. OpenGL 编程权威指南 [M]. 第 3 版. 吴 斌, 段海波, 薛凤武译. 北京: 中国电力出版社, 2001.