

细节高度复杂表面模型的视点相关渐进传输*

冀俊峰^{1,2,3+}, 李胜^{1,2,4}, 刘学慧¹, 吴恩华^{1,5}

¹(计算机科学重点实验室(中国科学院 软件研究所),北京 100080)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

³(国家信息中心,北京 100045)

⁴(北京大学 信息科学技术学院,北京 100871)

⁵(澳门大学 科学技术学院 计算机和信息科学系,澳门)

View-Dependent Progressive Transmission of Highly Detailed Surfaces

Ji Jun-Feng^{1,2,3+}, Li Sheng^{1,2,4}, Liu Xue-Hui¹, Wu En-Hua^{1,5}

¹(Key Laboratory of Computer Science (Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences), Beijing 100080, China)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(State Information Center of China, Beijing 100045, China)

⁴(School of Electronics Engineering & Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

⁵(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-68558730, E-mail: jijfn@mx.cei.gov.cn

Ji JF, Li S, Liu XH, Wu EH. View-Dependent progressive transmission of highly detailed surfaces. *Journal of Software*, 2006,17(10):2192–2198. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2192.htm>

Abstract: This paper presents a novel approach for the progressive transmission of highly detailed surfaces interactively. Based on the characteristics in human vision, 3D surfaces are converted into the hierarchical quadtree in parameter space and a normal texture atlas. By taking advantage of normal mapping, only the silhouette to current viewpoint is refined and transmitted, and consequently the amount of patches needed to transfer each frame is greatly reduced. The structure of the representation is simple, so efficient compression scheme can be applied to encoding the hierarchical topological structure. At the same time, the parametric patches can be transmitted in arbitrary order due to their regular connectivity, so the truly view-dependent transmission could be achieved in high efficiency. Experiment results show that the approach proposed is feasible and highly efficient in meeting the requirement, especially to those models with highly detailed surfaces.

Key words: progressive transmission; view-dependent; network; quadtree; normal mapping

摘要: 针对细节高度复杂模型的特点,提出一种视点相关的渐进传输方法.根据人的视觉特征,算法将模型表示为多分辨率的四边形参数面片和表面法向细节纹理.该算法利用法向映射提高传输和绘制的效率,然后随着

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60473105, 60033010 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312102 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Research Grant of University of Macau (澳门大学资助项目)

Received 2004-06-02; Accepted 2005-11-11

视点的变化动态细化和传输当前视点下轮廓部分的参数面片信息,从而最大限度地减少了模型传输时面片的数量.参数面片的结构规则,面片之间关联性低,因此能够按任意顺序高效地传输,从而实现真正的视点相关传输,并可以采用有效的编码方法对其结构和几何信息进行压缩.实验结果表明了该算法的有效性,特别适合于表面细节复杂的表面模型的交互传输和绘制.

关键词: 渐进传输;视点相关;网络;二叉树;法向映射

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

网络娱乐和电子商务的不断发展促使三维模型的网络传输应用日益广泛.与二维图像传输相比,三维模型数据量大,拓扑结构复杂.由于受到网络带宽的限制,通过网络直接传送全部模型需要很长时间.视点相关的渐进传输是目前有效的传输模式.

多边形网络的传输信息包括拓扑结构 K 和几何信息 V .根据拓扑结构的不同,多边形网络可分为任意拓扑结构网络和规则结构网络.其中任意拓扑结构网络对顶点连接关系不作限制,其渐进传输基于渐进网格^[1],在传输过程中需要不断修改网络的拓扑结构,实现过程较复杂.规则网格^[2]通常基于细分,拓扑连接关系简单、规则,数据传输简单、灵活,但模型表示数据量大.因此,规则网格适合表示表面细节高度复杂的模型.表面几何细节还可以转化为法向纹理,通过法向映射增强绘制图像的视觉效果^[3].法向映射并没有改变表面几何信息,因此,在轮廓部分绘制效果差.视点相关的多分辨率技术可对轮廓进行细化和增强.

P-Quadtree 是一种基于几何图像的多分辨率结构^[4].本文利用这种结构提出一种对表面细节高度复杂模型的交互式渐进传输新方法.通过对 P-Quadtree 视点相关的细化,将其树状层次结构动态序列化,每一结点面片作为数据传输的基本单位;表面法向分布则映射为法向纹理拼图.开始时首先传输最粗糙的初始结点面片和法向纹理,通过纹理映射提高表面细节的视觉效果.在每一视点下,通过视点相关的动态细化方法对轮廓部分进行增强即可获得令人满意的绘制效果.由于在每一视点下只需细化轮廓附近的面片,极大地减少了单一视点下需要传输的几何信息量.规则网格的拓扑与几何信息也有利于信息的有效编码,无指针二叉树^[5]可对结点面片的拓扑和几何结构进行编码压缩,法向网格^[6]可以把顶点的几何矢量坐标转化为基网格上的高度场.

1 相关工作

目前,人们针对三维模型的网络传输进行了大量研究.其中,渐进网格(progress mesh)^[1]被广泛应用于三维模型的渐进传输^[7],在传输之前还可以对数据作进一步的压缩^[8,9].很多商业化的模型传输系统利用渐进网格的思想,如 MetaStream 公司的 MTS 系统^[10]等.

对于规则或半规则网格,可通过多分辨率分析(multiresolution analysis)^[2]表示为基网格和一系列不断细分的小波系数.传输数据为基网格和小波系数,并可把表面模型的几何和颜色的小波系数分别传输^[11].法向网格^[6]和细分位移网格^[12]通过对基网格规则细分增加新顶点,将顶点坐标转化为标量表示,减少了顶点坐标的数据量.几何图像(geometry image,简称 GIM)^[13,14]表面模型的完全规则表示,在此基础上可建立多分辨率表示——P-Quadtree,表面细节可通过参数化映射形成纹理拼图(texture atlas)^[3],通过几何与光照细节的混合绘制可以提高绘制效率^[4].

视点相关的传输技术可以进一步提高渐进传输的效率.Southern 等人^[15]和 Kim 等人^[16]的视点相关的传输方法基于 Hoppe 的视点相关的渐进网格^[17].Yang 等人^[18]提出的视点相关的传输方法基于面片流.对于点表示模型^[19],由于点与点之间没有拓扑连接关系,因而能够更好地适应视点相关的传输^[20].但由于缺乏空间连贯性,点表示数据冗余大,传输效率并没有明显提高.

本文方法利用规则网格特点,面片之间相关性低,可以有效实现结点动态序列化,结点面片能够被灵活地按照当前视点进行细化和传输.既可以利用视点相关的多分辨率细化方法提高传输效率,又能利用法向映射技术获得较好的绘制效果.

2 方法概述

本文方法包括两个阶段:预处理阶段和数据传输阶段.在预处理阶段主要构造数据表示结构,并对数据进行编码压缩;数据传输阶段主要根据客户端的请求传输模型数据.方法的处理流程如图 1 所示.

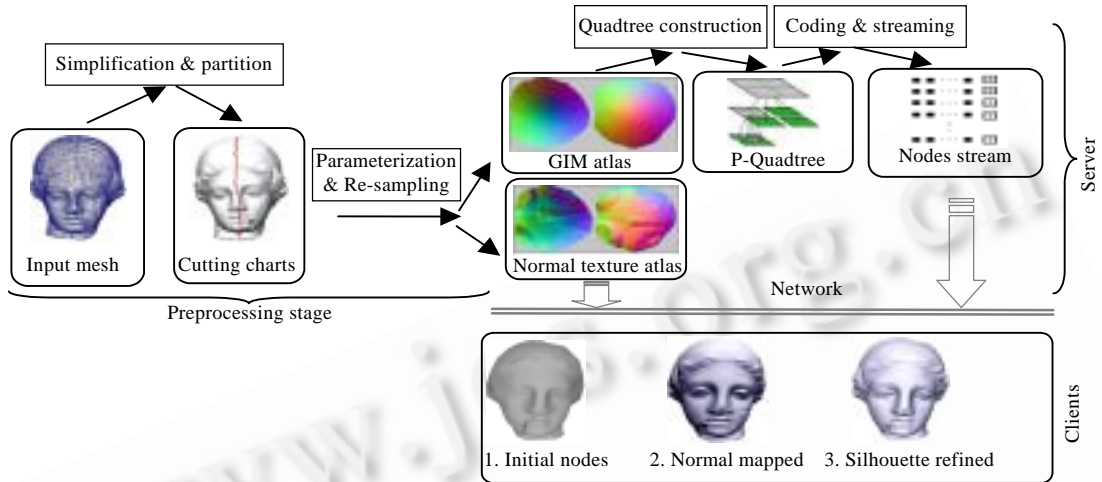


Fig.1 The process to interactively progressive transmission

图 1 交互式渐进传输处理和传输流程

3 通信数据流的结构

3.1 结点面片的数据结构

本文方法中传输的基本单元为四叉树结点,为可细分的线性面片.结点面片在物体空间为四边形平面,从拓扑学观点看,其结构可用二元组 (K, V) 表示,其中 K 是一单纯复形(simplicial complex),表示了顶点、边和面的连接关系; $V = \{v_i \in R^3 | i = 1, 2, \dots, m, m = 5, \dots, 9\}$,表示构成结点面片的顶点.

3.2 结点面片编码

P-Quadtree 结点编码可采用无指针四叉树^[5]的方式,将四叉树组织成一个线性表.其中每一结点到根结点的路径可由其在线性表中的位置确定,即其拓扑和层次结构可表示为一个整数,称为结构编码.结构编码的形式

为五进制形式,为了用最短编码表示更多结点数目,五进制应转化为十进制,解码时再将十进制编码转化为五进制.客户端通过对接收到的结构编码进行解码可以重建结点面片及其层次结构.如对于图 2(a)中的深色标明结点,其结构编码为 $(234)_5, 2 \times 5 + 3 \times 5 + 4 \times 5 = (117)_{10}$.

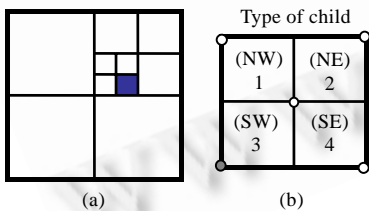


Fig.2 The pointerless quadtree coding
图 2 无指针四叉树编码

面片顶点坐标通常由 3 个浮点数组成.为了减少顶点传输的数据量,我们采用法向网格^[6]的方法将顶点对应物空间的三维坐标 (x, y, z) 转化为在基网格上在细分时的法向方向的位移,细分点及其法向根据隐式细分规则确定,这样,几何坐标可被编码为一个标量浮点数,称为几何编码.

每个结点面片被封装为一个通信数据包,一系列通信数据包组成通信数据流,其结构如图 3 所示.其中每一通信数据包的结构包括两部分:节点面片的结构编码和相应顶点的几何编码 V_i .如果通信数据包中的 V_i 包含的顶点数目相同,则可直接对信息编码按顺序传输.但结点面片中很多顶点都是多个面片共享,为了避免顶点数据的重复传输, V_i 包含顶点数是可变的.为此,需要在结点面片数据包中每一顶点用一位控制码确定各顶点是否在参数面片数据包传输.顶点在 V_i 中的顺序按其在控制码中的顺序排列.由于中央控制点必须传输,无须控制码,

因此控制码需要 4 位。

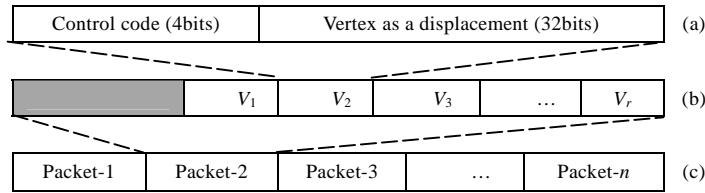


Fig.3 The data structure of communication stream

图 3 通信数据流的结构

4 参数面片的传输和重建

本文方法需要传输的数据流包括结点面片流和细节纹理。结点面片流包括初始面片流与细分面片流,两者的数据结构基本相同,但细分参数面片流对顶点几何坐标进行编码压缩,初始参数面片中顶点几何坐标用来作为采用法向网格对三维几何坐标编码的基网格,没有编码。细节纹理可以为颜色纹理,也可以为表面法向分布其他细节信息。模型传输时首先生成数据流,将数据流传输到客户端后,再进行模型重建与绘制。

4.1 数据流生成

结点面片流通过自顶向下方式按广度优先遍历 P-Quadtree 生成。为了适应视点相关的模型传输的需要,结点面片流需要动态生成。

初始面片作为几何编码中法向网格的基网格,与渐进网格基网格类似,它表示了模型的粗略轮廓和主要特征。由于几何图像边界形状不规则,P-Quadtree 中的边界结点包含空值像素,在 3D 空间没有对应的有效面片。因此,在遍历时需要细分所有的灰色结点,并只将得到的有效结点加入到序列流中。在几何图像边界附近得到的结点面片通常为最精细层次。

细分面片流根据客户端视点特性,通过对 P-Quadtree 进行视点相关细分生成,以增强当前视点下的轮廓。轮廓面片的确定使用 D. Luebke 等人提出的方法^[21]。

4.2 数据流传输

模型传输采用 Client-Server 模式。这是一种分布式网络计算模式,它的优势在于,将系统中的各部分任务分配给分布在网络上的担任不同角色的计算机,使之能够协调工作。在模型渐进传输时,网络服务器(server)接收到客户端(client)的请求后,根据观察视点参数,通过遍历 P-Quadtree,把结点面片的层次结构转换为线性数据流,按照由粗到精的顺序将参数面片发送到客户端。

数据传输的基本流程如下:

- (1) 建立服务器与客户端的通信对话(session);
- (2) 传输初始面片流,使用户可以看到模型的粗略特征;
- (3) 传输法向纹理,为表面添加光照细节。由于法向映射纹理坐标隐含在结构编码中,因此无须单独传输;
- (4) 服务器根据客户端的视点参数,生成细分参数面片流,传输到客户端。为了避免面片的重复传输,在服务器端需要为每一个客户的对话进程建立一个传输标志缓冲,记录结点是否已经被传输;
- (5) 当所有结点被传输完毕或者用户取消传输后,关闭对话进程。

4.3 模型重建和绘制

模型数据流被传送到客户端后,随即开始模型的重建。根据通信数据包中结点结构编码重建结点面片的拓扑与层次关系,重新构造 P-Quadtree,解码过程与十进制转化为五进制类似。当接收到通信数据包时,首先接收到初始面片流,由此重建 P-Quadtree 的最顶层,可以得到模型的粗略轮廓;然后根据收到的细节纹理增强表面细节,提高结果图像的真实感效果。本文使用法向映射作为表面细节的表示方法,利用 GPU 加速实现其细节光照的计

算;最后根据视点交互传输增强模型的几何轮廓,使 P-Quadtree 不断细化与完善.

绘制前需要消除由于不同层次相邻面片可能造成的裂缝,具体方法如下:在客户端建立与服务器端同样大小的几何图像,开始设置全部像素为空值,结点面片被解码后其顶点数据写到相应像素中.随着传输过程的不断进行,服务器端几何图像被逐步传送到客户端.绘制时通过检测参数面片的边上是否有细分顶点已经传输,如果已传输,则需要对参数面片增加辅助边消除裂缝.

5 实验结果及讨论

本文提出的传输方法的传输效果如图 4 所示.当初始网格传输后(如图 4(a)所示),即可将法向细节纹理集传输到客户机,视觉效果得到了极大的提高,特别是花瓶上浮雕图案的细微光照变化都能够表现得栩栩如生(如图 4(b)所示).但由于细节纹理只是表现绘制模型的表观光照效果,并没有改变其几何特征,因此,其轮廓部分变形较大.当视点发生变化时,粗糙的轮廓部分就会显示出来,如图 4(c)中灰色圆圈所示的区域.这时,将视点参数发送到服务器,请求发送当前视点下的轮廓结点流.随着轮廓流数据的传输,模型的几何轮廓部分就逐渐得到增强,很细微的表面几何细节都可以绘制出来.且需要传输的数据量少,只比初始网格增加了约 3%左右的几何数据量,如图 4(d)所示.

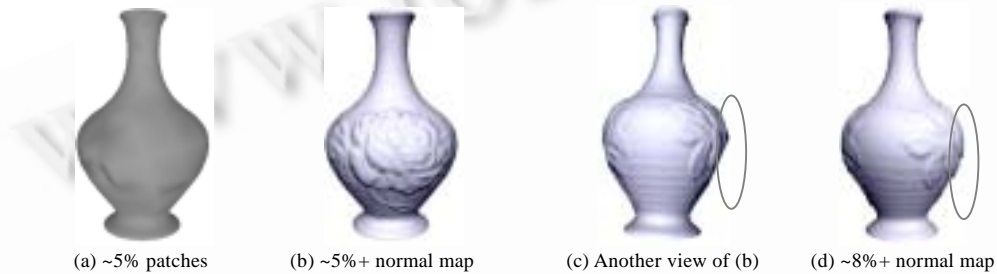


Fig.4 The detail enhancement and geometry refinement in the transmitting process

图 4 传输过程中细节与几何的增强

轮廓的增强与视点密切相关.我们使用视点相关的层次细节(LOD)选择方法来增强轮廓.图 5 说明了我们的传输方法的视点相关特性,其中:图 5(a)、图 5(c)和图 5(b)、图 5(d)分别为轮廓增强 LOD 的几何网格和绘制效果;图 5(e)是视点突然改变后的网格结构.从该图中可见:只有轮廓附近的表面特征得到增强,而其他部分的细分面片还没有被传输.随着视点的改变,新的视点参数被传送到服务器,重新生成细分面片流,继续传输.

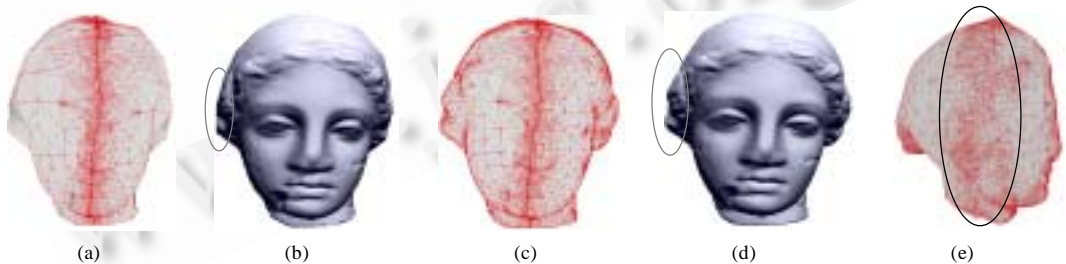


Fig.5 View-Dependent refinement in interactive transmission

图 5 交互式传输的视点相关的细化

图 6 说明了渐进传输过程的主要阶段.其中:图 6(a)显示了传输开始时得到的初始面片;图 6(b)是根据初始面片直接进行几何绘制的结果;而图 6(f)则是利用法向映射纹理增强后的效果,表现绘制效果明显得到极大提高.但其几何轮廓部分,特别是在兔子的后腿部明显粗糙,为此需要通过传输细分面片流来增强轮廓.图 6(c)、图 6(d)为轮廓部分通过传输细分面片的增强效果.由于主要针对轮廓部分进行增强,需要传输的几何数据量很少.虽然图 6(d)中的面片数据量只有图 6(e)中的 10%,但在当前视点下,绘制效果几乎完全相同.

与基于细分网格的方法^[11,22]相比,本文所提传输方法的优势是,可以实现灵活、高效的数据流化,能够专门针对模型特定部分或特征,按照灵活顺序优先传输,实现真正的视点相关传输.再结合细节纹理,使得渐进传输只需要细化轮廓部分,需要传输面片的数量大为减少,从而满足交互式传输的要求.由于拓扑结构是隐含的,通常基于规则细分网格的传输方法在面片序列化时灵活性较差,很难实现.本文方法基于规则网格,与基于渐进网格的传输方法^[7-10,16,18]相比,其纹理坐标隐含在拓扑结构中,纹理坐标无须再单独传输.本文方法具有规则网格方法的优点,同时克服了其不足.

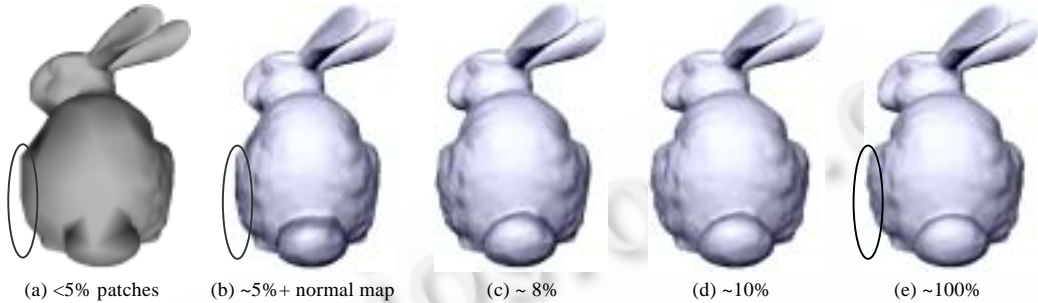


Fig.6 The process of our transmitting approach

图6 渐进传输方法的各个阶段

表1(性能数据测试平台是2.6GHz Pentium 4处理器,1G DRAM内存,操作系统为Windows 2000)为本文提出的交互式渐进传输及其性能统计结果,其中每一帧需要传输的结点的数据都较少.由于P-Quadtree的遍历效率很高,数据流的生成速率很快,因而能够满足多客户机对模型数据的并发传输请求.

Table 1 The performance statistics of the model transmitted approach

表1 模型传输结果性能统计

Model	Igea	Vase	Bunny
# Charts	2	2	9
# Total samples	99 975	40 559	140 753
# Initial samples	2 352	1 647	6 613
# Refined samples on silhouette per-frame	~1 233	~538	~2 035
Streaming rate for the P-Quadtree on server (fps)	38	80	21

6 结 语

本文提出了一种以交互方式渐进传输的表面细节高度复杂的新方法.所提出的方法通过模型几何细节与光照映射的综合利用,提高了模型传输的效率,并有效改善了图像绘制质量.由于在传输过程中充分考虑了人的视觉特性,使用了视点相关的层次细化技术,并通过高效的信息编码压缩技术,极大地提高了模型的传输效率,可以满足细节高度复杂模型交互传输的需要.

本文方法主要适用于表面细节高度复杂模型.对于几何特征尺度差别特别大的模型(如树的模型包含树干,各种不同尺度的树枝以及树叶等),将使得模型的几何图像剖分成很多chart表示,影响了算法的传输效率.

References:

- [1] Hoppe H. Progressive meshes. In: Rushmeier H, ed. Proc. of the SIGGRAPH '96. New York: ACM Press, 1996. 99-108.
- [2] Eck M, DeRose T, Duchamp T, Hoppes H, Lounsbery M, Stuetzle W. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In: Mair SG, Cook R, eds. Proc. of the SIGGRAPH '95. New York: ACM Press, 1995. 173-182.
- [3] Tarini M, Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Real time, accurate, multi-featured rendering of bump mapped surfaces. Computer Graphics Forum, 2000,19(3):119-130.
- [4] Ji JF, Li S, Liu XH, Wu EH. Parameter space based rendering structure for hybrid rendering. Journal of Software, 2004,13(10): 1796-1803 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1796.htm>
- [5] Samet H. The Quadtree and related hierarchical data structures. ACM Computing Surveys, 1984,16(2):187-260.
- [6] Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, Schröder P. Normal meshes. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 95-102.

- [7] Prince C. Progressive meshes for large models of arbitrary topology [MS. Thesis]. University of Washington, 2000.
- [8] Pajarola R, Rossignac J. Compressed progressive meshes. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2000,6(1):79-93.
- [9] Qin XJ, Liu XG, Bao HJ, Peng QS. Progressive geometry compression for meshes. Journal of Software, 2002,13(9):1804-1812 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1804.htm>
- [10] Abadjev V, del Rosario M, Lebedev A, Migdal A, Paskhaver V. MetaStream. In: Proc. of the VRML'99. New York: ACM Press, 1999. 53-62. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=299262&coll=portal&dl=ACM>
- [11] Khodakovsky A, Schröder P, Sweldens W. Progressive geometry compression. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000.
- [12] Lee A, Moreton H, Hoppe H. Displaced subdivision surfaces. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 85-94
- [13] Gu XF, Gortler S, Hoppe H. Geometry images. In: Appolloni T, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2002. New York: ACM Press, 2002. 355-361.
- [14] Sander P, Wood Z, Gortler S, Snyder J, Hoppe H. Multi-Chart geometry images. In: Proc. of the Eurographics Symp. on Geometry. 2003. 146-155. <http://www.eg.org/EG/DL/WS/SGP03>
- [15] Southern R, Perkin S, Barry S, Muller A, Marais P, Blake E. A stateless client for progressive view-dependent transmission. In: Pencer S, ed. Proc. of the Web3D Symp. New York: ACM Press, 2001. 43-49.
- [16] Kim J, Lee S, Kobbelt L. View-Dependent streaming of progressive meshes. In: Giannini F, Pasko A, eds. Proc. of the Shape Modeling Int'l 2004. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004. 209-220.
- [17] Hoppe H. View-Dependent refinement of progressive meshes. In: Whitted T, ed. Proc. of the SIGGRAPH'97. New York: ACM Press, 1997. 189-198.
- [18] Yang S, Kim C, Kuo C. A progressive view-dependent technique for interactive 3D mesh transmission. IEEE Trans. on Circuit and System for Video Technology, 2004,14(11):1249-1264.
- [19] Rusinkiewicz S, Levoy M. QSplat: A multiresolution point rendering system for large meshes. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 343-352.
- [20] Rusinkiewicz S, Levoy M. Streaming QSplat: A viewer for networked visualization of large, dense models. In: ACM Symp. on Interactive 3D Graphics. New York: ACM Press, 2001. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=364338.364350>
- [21] Luebke D, Erikson C. View-Dependent simplification of arbitrary polygonal environments. In: Whitted T, ed. Proc. of the SIGGRAPH'97. New York: ACM Press, 1997.
- [22] Yu XZ, Feng J, Zha HB. Progressive transmission of displaced butterfly subdivision surfaces. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004,16(5): 625-631 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [4] 冀俊峰,李胜,刘学慧,吴恩华.参数空间的混合多分辨率绘制.软件学报,2004,13(10):1796-1803. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1796.htm>
- [9] 秦绪佳,刘新国,鲍虎军,彭群生.网格的渐进几何压缩.软件学报,2002,13(9):1804-1812. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1804.htm>
- [22] 于行洲,冯洁,查红彬.位移蝶形细分面片的渐近传输.计算机辅助设计和图形学学报,2004,16(5):625-631.



冀俊峰(1967 -),男,河北临漳人,博士,主要研究领域为计算机图形学,数字几何处理与绘制,电子政务.



刘学慧(1968 -),女,博士,副研究员,CCF高级会员,主要研究领域为计算机图形学.



李胜(1974 -),男,博士,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实技术.



吴恩华(1947 -),男,博士,研究员,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实.