

面向移动终端的三角网格逆细分压缩算法*

马建平^{1,2,3}, 罗笑南^{1,3+}, 陈渤⁴, 李峥^{1,3}

¹(中山大学 信息科学与技术学院, 广东 广州 510275)

²(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

³(数字家庭教育部重点实验室(中山大学), 广东 广州 510275)

⁴(东北微电子研究所, 辽宁 沈阳 110032)

Triangle Mesh Compression Based on Reverse Subdivision for Mobile Terminals

MA Jian-Ping^{1,2,3}, LUO Xiao-Nan^{1,3+}, CHEN Bo⁴, LI Zheng^{1,3}

¹(School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

²(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

³(Key Laboratory of Digital Life (Sun Yat-Sen University), Ministry of Education, Guangzhou 510275, China)

⁴(NorthEast Microelectronics Institute, Shenyang 110032, China)

+ Corresponding author: E-mail: lnslxn@mail.sysu.edu.cn

Ma JP, Luo XN, Chen B, Li Z. Triangle mesh compression based on reverse subdivision for mobile terminals.

Journal of Software, 2009,20(9):2607-2615. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3404.htm>

Abstract: A triangle mesh compression algorithm based on reverse subdivision is introduced. By improving reverse Butterfly simplification algorithm, a mesh simplification algorithm based on reverse Modified Loop scheme is proposed. The dense triangle mesh is decomposed into progressive meshes which consist of a base mesh and a series of displacement wavelets. The progressive meshes are compressed with embedded zerotree coding by constructing displacement wavelets tree structure. The experiments show that the proposed approach is faster and more efficient than previous related techniques. The proposed algorithm can be used for progressive transmission over wireless networks and 3D graphics real-time rendering on mobile terminals.

Key words: reverse subdivision; mobile terminals; mobile 3D graphic; progressive mesh; zerotree coding

摘要: 针对移动用户的实时显示需求,提出一种基于逆细分的三角网格压缩算法.通过改进逆 Butterfly 简化算法,采用逆改版 Loop 模式,将细密的三角网格简化生成由稀疏的基网格和一系列偏移量组成的渐进网格;然后,通过设计偏移量小波树,将渐进网格进行嵌入式零树编码压缩.实验结果表明:该算法与以往方法相比,在获得较高压缩比的同时,运行速度较快.适用于几何模型的网络渐进传输和在移动终端上的 3D 图形实时渲染.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60533030 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303106 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China under Grant No.60525213 (国家杰出青年科学基金); the Joint Funds of NSFC-Guangdong of China under Grant No.U0735001 (NSFC-广东联合基金); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20060558078 (高等学校博士学科点专项科研基金)

Received 2007-06-03; Revised 2008-03-11; Accepted 2008-05-29

关键词: 逆细分;移动终端;移动 3D 图形;渐进网格;零树编码

中图法分类号: TP391

文献标识码: A

随着无线技术的发展,人们正在享受无线网络提供的应用与服务.作为多媒体数据的一种形式,移动三维图形的需求越来越大.由于高分辨率的几何模型具有数万个三角形,在短时间内存储和显示如此庞大的数据对移动终端存在很大的压力;另一方面,即使先进的 3G 无线网络,在静态时也只能提供 2Mbps 的带宽,移动状态时带宽将降到 128Kbps^[1].所以,寻找占用存储空间少,适合于网络传输的几何模型表示方法,以及研究适合于移动终端的三维几何模型快速渲染算法是移动图形应用要解决的关键问题.

几何模型的压缩方法可以分为单分辨率压缩和渐进压缩.单分辨率压缩^[2]尽管能够最大限度地保持压缩精度,但这种方法通常不能被移动用户接受,因为只有全部模型数据下载以后图形才能渲染;渐进压缩^[3,4]可以提供灵活的、交互式的方式,用户先快速存取轮廓模型,然后边下载细节信息边对模型渐进加细.因此,具有多分辨率^[5]的渐进网格^[6]是移动图形首选的表示方法.

对于任意三角网络的渐进压缩,具有代表性的方法有 Khodakovsky^[3]和 Mongkolnam^[4]等人的多分辨率压缩方法.两者分别用 MAPS^[7]和二次误差测量(QEM)^[8]对原模型简化,对简化的网格用细分^[9-11]等方法去拟合原模型,得到半正则的网格 S^n ,再对 S^n 进行逆变换生成渐进网格.但是两种方法在进行从细到粗的逆变换时,分别需要用共轭梯度法和 Gauss-赛德尔法求解复杂的线性方程.文献[12]提出了基于 Marching Cubes 重组的外存模型渐进压缩方法,将大数据量的外存模型进行多层八叉树的剖分后调入内存进行分单元的压缩,从而达到对外存模型进行整体压缩的目的.此方法解决了大数据模型数据的分块压缩问题,但算法不适用于资源匮乏的移动终端.文献[13,14]分别结合渐进压缩算法生成数据结构,提出了适应于无线网络 3D 图形流媒体渐进传输的中间件架构,文献[15]针对无线网络渐进传输,提出了基于逆 Butterfly 模式的渐进网格生成算法,并给出了在移动设备上三维图形渐进重建的方法,部分地解决了移动环境下几何模型的网络传输与显示问题.但是 Butterfly 模式^[9]相关联的顶点数目较多,影响了模型重建的速度.

由于移动终端的显示屏较小且分辨率较低,用户并不一定要精确的图形显示,但对图形显示的实时性要求较高.针对已有方法的局限性及移动终端的特点,本文提出了一种基于逆细分的三角网格压缩算法.首先,通过改进逆 Butterfly 简化方法^[15],提出了基于逆改版 Loop 模式的三角网格简化算法,将细密的网格分解生成由稀疏的基网格和一系列偏移量组成的具有多分辨率的渐进网格;然后,通过构建偏移量小波树,对偏移量小波进行嵌入式零树小波编码压缩;最后,通过实例证明了算法的快速和有效性.

1 相关工作及设计思想

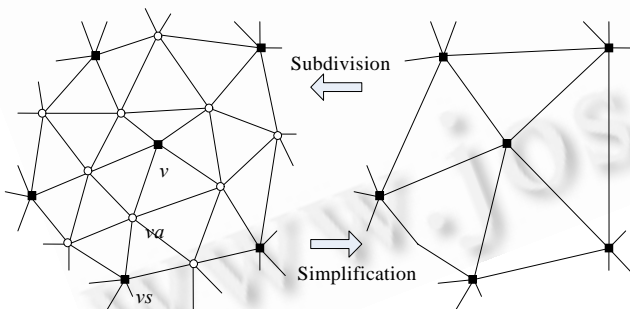


Fig.1 Mesh simplification and subdivision relationship

图 1 曲面细分与网格简化关系

曲面细分是一种有效的几何造型生成方法.常用的基于三角网格的细分模式有:逼近型的 Loop 细分^[10]和插值型的 Butterfly 细分^[9]等.它们都是对三角形进行 1-4 面分裂操作,按照不同的规则在粗网格的每条边上增加一个新顶点,逐层加细,在极限情况下分别生成具有 C^2 和 C^1 阶光滑的曲面.曲面细分与网格简化有着密切的联系,如图 1 所示,网格简化是曲面细分的逆过程,也称逆细分^[16].

在进行三角网格变换时,最典型的方法是利用插值型 Butterfly 模式,如图 2(b)所示的细分模板,其好处在于无论是正变换的曲面细分还是逆变换的网格简化均可以使用同一个确定的公式(1):

$$v_o = \frac{1}{16}[8(v_1 + v_2) + 2(v_3 + v_4) - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)] \quad (1)$$

文献[15]基于逆 Butterfly 模式^[9]将细密的网格分解生成渐进网格,但 Butterfly 细分有 8 个相关联的顶点,其中 4 个是一环上的邻接点,另外 4 个是二环上的邻接点,运算开销相对较大;此外,文献[15]每简化一次,都要用更新算子对网格进行补偿,影响网格的简化和重建速度.

Loop^[10]是逼近型的细分模式,如图 2(a)的细分模板,其细分时除计算新增的顶点(奇点) v_o 外,顶点(偶点) v_e 也要根据原网格中此点 v 和相邻顶点 v_i 所占的权值作相应的改变,顶点计算见式(2).

$$\begin{cases} v_o = \frac{3}{8}(v_1 + v_2) + \frac{1}{8}(v_3 + v_4) \\ v_e = (1 - n\beta_n)v + \beta_n \sum_{i=0}^{n-1} v_i \end{cases} \quad (n \geq 3) \quad (2)$$

其中, $\beta_n = \frac{1}{n} \left(\frac{5}{8} - \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 \right)$, n 表示偶点的度数.如果将 Loop 模式作逆变换,同样需要求解复杂的矩阵方程.

分析 Loop 模式^[10]和逆 Butterfly 简化方法^[15]产生以下设计思想:

(1) Loop 细分更新的偶点坐标是由粗网格中的此点及相邻顶点经权值计算所得.调整偶点的目的是为了生成光滑的曲面.而网格压缩的前提是:几何模型是已经通过设计的光滑的模型,做逆变换的目的是将几何模型进行分解,以适合于网络渐进传输.故在模型简化时,不必调整偶点坐标.结合逼近型 Loop 模式和插值型 Butterfly 模式的优点,定义改版 Loop(modified Loop)模式为

$$v_o = \frac{3}{8}(v_1 + v_2) + \frac{1}{8}(v_3 + v_4) \quad (3)$$

改版 Loop 模式是插值型的,且仅与一环上 4 个邻接点相关联,运算开销显然比文献[15]的要小.

(2) 在三角网格中奇异点表示了几何模型尖锐、边角等特征.如果在每次逆细分简化时保留奇异点,就可以较好地保持原模型的特征.另外,网格逆细分简化的目的是将大的模型数据分解,最终还是要在移动终端上重建模型,故不必在简化时计算更新算子^[15].这样,可以提高网格简化的速度,当然也加快了模型重建的速度.

2 几何模型渐进压缩算法

在三角网格中,定义与六条边相连的顶点为正则点,非正则的顶点为奇异点,所有顶点都是正则点的网格为正则网格,多数顶点是正则点的网格为半正则网格.

几何模型的三角网格可以表示成 $M=(P,K)$,其中 P 表示网格顶点坐标的集合, $P_i=(x_i, y_i, z_i) (1 \leq i \leq n)$, K 表示网格拓扑信息集合.对于一个半正则网格 $M^n=(P^n, K^n)$,可以简化生成同构的网格 $M^j=(P^j, K^j) (1 \leq j \leq n-1)$,其中 $M^0=(P^0, K^0)$ 是基网格.

2.1 基于逆改版 Loop 模式的网格简化算法

由于逆 Butterfly 简化方法^[15]相关联顶点多,而文献[3,4]的方法需要解复杂的线性方程,故作者提出了基于逆改版 Loop 模式的网格简化算法.

将较细密的网格 $M^j=(P^j, K^j)$ 简化成较低分辨率的网格 $M^{j-1}=(P^{j-1}, K^{j-1})$,算法由以下 3 个步骤组成:

(1) 顶点分裂

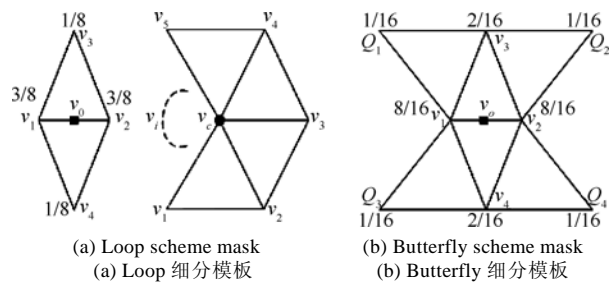


Fig.2 Loop and Butterfly scheme mask

图 2 Loop 和 Butterfly 细分模板

将三角网格中的所有顶点分裂为偶点和奇点,分别归到奇点集 P_o^j 与偶点集 P_e^j 中,即 $(P_o^j, P_e^j) = \text{split}(P^j)$.

根据设计思想 2,奇异点是需要保留的信息.故首先选奇异点 v (图 1),设为偶点(黑方顶点),与其相连邻的 5 个顶点 va 设为奇点(空圆顶点);对以 v 为中心,与 va 相邻的对称点 vs 设为偶点,这样依次分裂下去,直到将网格中所有的顶点分裂完毕.可见,奇点和偶点有规律地分布在三角网格中,每个偶点被奇点包围.可以验证,奇异点度数不等于 5 的网格同样适用于上述结论.

顶点分裂算法描述为:首先,如果是半正则网格,任选奇异点 v ,否则,任选一个正则顶点 v ;然后调用设置偶点函数 $\text{SetEvenVertex}(v)$.将 v 设为偶点,其函数伪代码为:

```

Void SetEvenVertex(v)
    {if ( $v \in P_e^j$ ),return true;
    if ( $v \in P_o^j$ ),return fault;
     $P_e^j = P_e^j \cup \{v\}$ ;
    for (each neighboring  $va$  of  $v$ )
        {if ( $va$  is an extraordinary vertex ) || ( $va \in P_e^j$ ),return fault;
         $P_o^j = P_o^j \cup \{va\}$ ;
        find  $vs$ ;
        SetEvenVertex( $vs$ );
        }
    return true;
}

```

$\text{SetEvenVertex}(v)$ 是递归调用的,直到将网格中所有顶点分配到奇点集和偶点集为止.顶点分裂算法要求三角网格是半正则网格,即满足公式(4):

$$\text{Distance}(P_i, P_j) = 2^k, k=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

其中, P_i, P_j 表示网格中任意两个奇异点, $\text{Distance}(P_i, P_j)$ 表示两个奇异点间相连接边的数目, k 表示可以进行简化的次数.对于不满足式(4)的三角网格,需要通过文献[3,4,17]的方法对网格进行预处理.

(2) 奇点预测

网格中的顶点分裂成奇点与偶点两个集合后,由于表示几何特征的奇异点归到偶点集中,故将奇点集作为冗余的信息予以删除.在删除奇点前,要建立偶点与奇点之间的联系,以便以后的模型重建.根据设计思想 1,用改版 Loop 模式作为预测器,计算实际奇点与预测奇点的差值得到偏移量集 d^j .

$$d^j = P_o^j - \text{Predictor}(P_e^j) \quad (5)$$

网格 M^j 中每个奇点都产生一个偏移量 d_i^j , d_i^j 是向量,是要保存的信息.由于几何模型是分段光顺的,网格中邻接顶点之间的位置不会有很大的突变,故偏移量 d^j 的值很小,多数偏移量趋于 0.

(3) 网格重新三角化

建立奇点与偶点的关系后,将奇点 P_o^j 删除,余下的偶点 P_e^j 作为较粗层网格的顶点 P^{j-1} ,重新三角化这些顶点得到新的拓扑 K^{j-1} ,这样就生成了新网格 $M^{j-1} = (P^{j-1}, K^{j-1})$.由于网格中的奇异点都保留下来,故简化后新生成的粗网格 M^{j-1} 基本保持着上一层网格 M^j 的特征.

重复以上 3 个步骤,可以将稠密的网格 M^n 简化成基网格 M^0 ,即生成具有多分辨率的渐进网格: $M^n \rightarrow M^{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow M^1 \rightarrow M^0$,同时还生成了一系列偏移量 d^j .渐进网格表示为 $M^0, d^0, d^1, \dots, d^{n-1}$.

2.2 嵌入式零树网格编码

三角网格经过逆细分简化后,生成由基网格和一系列偏移量组成的渐进网格.每简化一次,网格的顶点和三角形的数目各减少 3/4,但由于减少的奇点数目与增加的偏移量数目相等,故网格的压缩效果并不理想.经 3 次简化后的渐进网格与简化前的网格压缩比约 45.31%(见第 3 节),压缩效率较低.

对于生成的渐进网格,其基网格存储量相对很小,偏移量信息占据了很大的存储空间.由于偏移量具有集中在零值附近并逐层衰减的特性,可将其视为小波进行嵌入式零树编码.EZW^[18]和 SPIHT^[19]是针对二维图像提出的小波编码算法,在图像处理中得到了广泛的应用.本文利用此思想对渐进网格偏移量小波进行压缩,不同的是,图像小波是二维标量,而图形小波是三维向量.问题的关键是如何构建偏移量向量小波树.

文献[3]提出了利用三角形的边构造树结构的方法,将粗网格的每条边与下一层较细网格中四条边建立对应关系,图3分别示意粗网格中用箭头、实圆点、空方点的3条边在较细网格对应4条边的位置.

由于渐进网格的偏移量小波与三角形的边一一对应,所以在建立边的树结构的同时,也就完成了偏移量小波树的构建.可见,偏移量小波构成了二叉树,除最低频子带以外,每个节点都有4个孩子.

引用嵌入式零树小波思想对渐进网格的偏移量小波进行编码,当某节点的3个小波分量都小于阈值时,则视此小波为不重要的,并假定:如果小波在粗网格中不重要,则其孩子在细网格中也不重要,将此节点连同孩子均设为零树.零树不必在网络中传输,否则,偏移量连同其位置和符号信息一起传输.

初始阈值 ε_0 估算: $\varepsilon_0 \geq \max(|d_i^0|)/2$ (for all i).

ε_0 的取值可根据压缩效率的要求而定.对不同层次 $j(0 \leq j \leq n-1)$,阈值递减 $\varepsilon_{j+1} = \varepsilon_j/2$.

2.3 网格重建方法

渐进网格依照次序 $M^0 \rightarrow d^0 \rightarrow d^1 \rightarrow \dots \rightarrow d^{n-2} \rightarrow d^{n-1}$ 在网络中渐进传输.

几何模型的重建是网格简化的逆过程,也是渐进进行的.首先根据基网格 M^0 ,构建 M^0 轮廓模型,再利用改版Loop模式对网格 M^0 进行插值型1-4细分,新产生的顶点通过偏移量 d^0 进行调整,得到网格 M^1 .依此类推,直到完全重建 M^n 模型或得到的模型 M^j 的分辨率能满足移动终端的分辨率要求为止.

原网格可实现无损/无损地重建.当阈值 $\varepsilon_0=0$ 值时,模型只进行了网格简化,并没有进行嵌入式编码压缩,此时实现在移动终端上无损重建.由于改版Loop模式的相关联顶点只有一环上的4个邻接点,比文献[15]减少了一半;经嵌入式零树编码压缩后,偏移量小波的数目大量减少,减少了运算开销,此外,不必像文献[15]计算更新算子,所以,模型重建的速度加快.

3 实验结果与分析

作者首先对 e-Sphere, Gourd, Head, Teddy 等模型进行了网格简化测试,图4显示了了几种模型的原始图形和简化生成的基网格.量化的比特率为:30 bits/vertex、16 bits/顶点序号、24 bits/偏移量.对 e-Sphere 模型存储量进行了统计,当几何模型简化3次时,生成的渐进网格与原网格的存储压缩比是45.31%,压缩效果并不明显.

对渐进网格进行嵌入式零树编码压缩.初始阈值 ε_0 的取值影响了模型的压缩效率及模型重建的效果.图5显示了茄子模型不同的阈值 ε_0 编码压缩后,模型重建的渲染效果.原模型如图5(f)所示.当 $\varepsilon_0=0.06$ 时,压缩比=12.05%,模型重建的效果仍然良好,比仅用网格简化,压缩效率提高了3.76倍.

本文引用 L^2 距离误差^[4]来测量编码压缩后重建模型与原模型的失真度.作者对经编码压缩的效率及模型重建的误差进行了统计,见表1.模型重建的误差通过 Metro(v4.06)^[18]测量软件计算,原模型对角线长为25.076 065,表中 L_j^2 是 L^2 相对原模型对角线的误差.

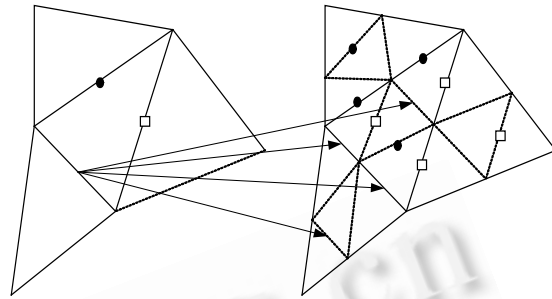


Fig.3 Wavelets tree construction

图3 小波树结构示意图

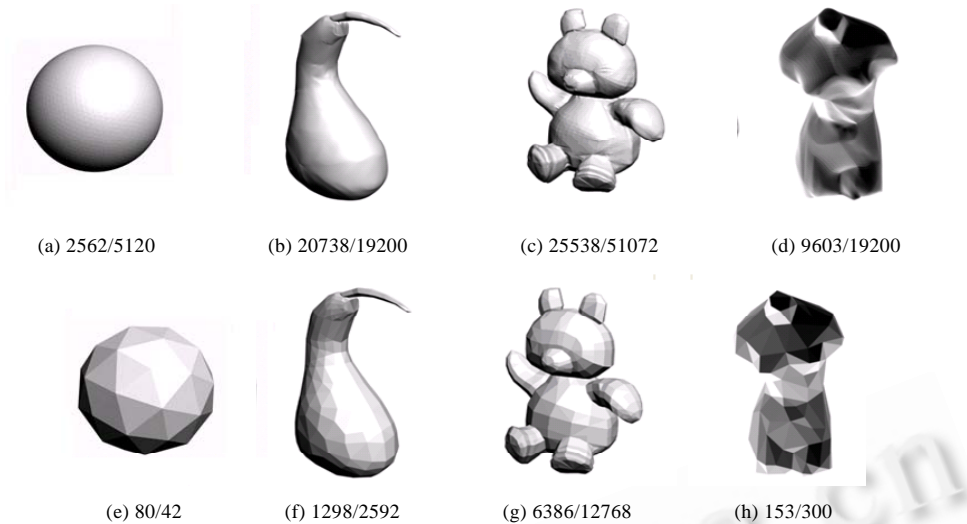


Fig.4 Original meshes (a)~(d) and base meshes after simplification (e)~(h) (Vertices/faces)

图 4 原始网格(a)~(d)与简化后的基网格(e)~(h)(Vertices/faces)

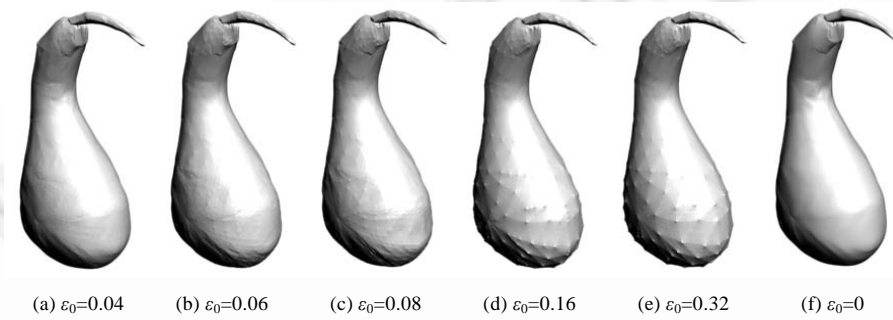


Fig.5 Gourd reconstruction after compression with different thresholds, (f): Original mesh

图 5 Gourd 模型用不同阈值压缩后重建效果(f:原始模型)

Table 1 Compression rate and distortion of gourd model at different threshold

表 1 不同阈值的 Gourd 模型数据压缩比与误差

Base mesh	Threshold ϵ_0	Offset (level 0) (K)	Offset (level 1) (K)	Offset (level 2) (K)	Total (K)	Compression ratio (%)	L^2	E_d^2 (10^{-4})
326Vertices/648 faces, 4.99K	0	6.64	26.58	106.31	144.52	45.31	0.0	0
	0.04	5.04	16.63	36.17	62.83	19.70	0.060 503	24.13
	0.06	4.01	11.22	18.22	38.44	12.05	0.072 388	28.87
	0.08	3.20	7.26	9.56	25.01	7.84	0.106 116	42.32
	0.16	0.79	1.26	1.26	8.30	2.60	0.174 675	69.65
	0.32	0.04	0.10	0.11	5.2K	1.65	0.230 121	91.76

图 6 显示了 Head 模型的实验结果,其中(a)是原始网格(45442 vertices/90880 faces),占存储空间为 698.91KB, (e)是基网格(712vertices/1420faces),占存储空间 10.93KB,(b)~(d)是经过不同阈值编码后重建的模型,压缩比分别为 29.52%,14.32%和 8.03%.

作者在 Window CE 4.0 环境下,利用 POCKET PC 2003 模拟器(分辨率为 240×320),将 Head 模型渐进重建的结果进行显示,如图 7 所示,当 Head 模型完成重建时,压缩比是 14.23%,此时压缩效率比仅用简化算法提高了 3.18 倍.

作者对逆改版 Loop 与逆 Butterfly 的算法运算速度进行了比较(CPU: Intel Pentium 4 1800Mhz,RAM 512MB),见表 2.结果表明:本算法运行速度更快,特别是在模型重建时,前者比后者速度提高了 1 倍以上.

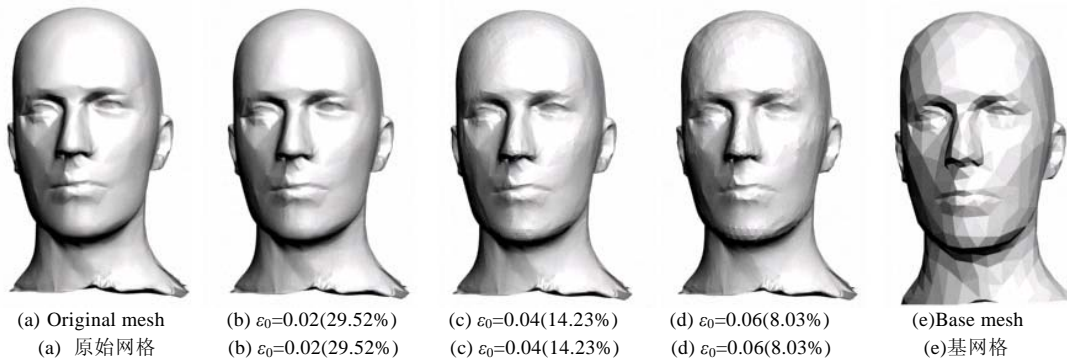


Fig.6 Head model reconstruction after compression

图 6 Head 模型压缩后重建图形效果



Fig.7 Mesh progressive reconstruction (Compression ratio=14.23%)

图 7 网格渐进重建 (压缩比=14.23%)

Table 2 Runtimes statistics for simplification and reconstruction

表 2 网格简化与模型重建运行时间统计

Model	Vertices/ faces (In)	Vertices/ faces (Out)	Layers	Meshes reconstruction times (s)			
				Meshes simplification		Meshes reconstruction	
				Modified loop	Butterfly	Modified loop	Butterfly
Gourd	20 738/41 472	326/648	4	6.022	13.345	2.130	4.717
e-Sphere	2 562/5 120	12/20	5	2.906	3.923	0.292	0.621
Venus	9 603/19 200	153/300	3	10.813	19.031	1.338	3.017
Head	45 442/90 880	712/1 420	4	25.991	43.002	4.863	10.314

本文采用的递归简化算法,其算法的时间复杂度为 $O(n)$,效率比非递归算法相对要差,但 3D 图形网络的压缩通常在服务器端离线(off-line)一次性完成,而图形重建要求在移动用户端实时完成,故图形数据传输与图形重建的速度是移动图形应用的重要指标.

4 结 论

本文提出了基于逆改版 Loop 模式的网格简化,将细密的几何模型快速分解生成多分辨率的渐进网格,经嵌入式零树编码对渐进网格的偏移量小波进行压缩,将复杂的几何模型用较小数据量、适合于网络渐进传输的渐进网格来表示.针对移动终端对图形渲染速度要求高的特点,本文采用了以下几种方法:① 利用改版 Loop 模式作为预测器,既避免了调整偶点坐标值,又使参与运算的顶点比文献[15]要减少一半;② 在模型简化过程中,始终将奇异点作为偶点保留,来保持原模型的特征,省去了运算更新算子的开销;③ 将基于二维图像的嵌入式零树编码算法应用到对三维几何模型小波的编码压缩,减少了图形传输的数据量和模型重建的运算量.

本文为几何模型的渐进传输和在移动终端上模型的快速渲染提供了可实施的方案.实验结果表明,本方法与逆 Butterfly 算法^[15]相比,模型重建速度快 1 倍以上.当几何模型无损重建时,两者方法压缩效率相同;当几何模型有损重建时,压缩效率可提高 3 倍.另一方面,如果改进数据结构,模型重建速度将更快.由于移动设备通常的分辨率较低,许多情况下不需要传输完整的模型,下一步我们将研究自适应渐进传输方法和依据视觉的自适应显示方法.

References:

- [1] Shen J, Han B, Yuen MC, Jia WJ. End-to-End wireless multimedia transmission system. In: Proc. of the Vehicular Technology Conf., Vol.4. 2004. 2616–2620. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1400530
- [2] Bajaj C, Pascucci V, Zhuang G. Single resolution compression of arbitrary triangular meshes with properties. In: Storer JA, Cohn M, eds. Proc. of the IEEE Data Compression Conf. Washington: IEEE Computer Society, 1999. 307–316.
- [3] Khodakovsky A, Schröder P, Sweldens W. Progressive geometry compression. In: Akeley K, ed. Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 271–278.
- [4] Mongkolnam P, Razdam A, Farin G. Lossy 3D mesh compression using loop scheme. In: Hamza MH, ed. Proc. of the Computers Graphics and Imaging 2003. Calgary: ACTA Press, 2003. 103–110.
- [5] Lounsbery M, Deroose T, Warren J. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. ACM Trans. on Graphics, 1997,16(1):34–73.
- [6] Hoppe H. Progressive meshes. In: Rushmeier H, ed. Proc. of the ACM SIGGRAPH'96. New York: ACM Press, 1996. 99–108.
- [7] Lee AWF, Sweldens W, Schroder P, Cowsar L, Dobkin D. MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surface. In: Cunningham S, Bransford W, Cohen MF, eds. Proc. of the ACM SIGGRAPH'98. Orlando: ACM Press, 1998. 95–104.
- [8] Garland M, Heckbert P. Surface simplification using quadric error metrics. In: Turner W, ed. Proc. of the ACM SIGGRAPH'97. Los Angeles: ACM Press, 1997. 209–216.
- [9] Dyn N, Levin D, Gregory JA. A butterfly subdivision scheme for surface interpolatory with tension control. ACM Trans. on Graphics, 1990,9(1):160–169.
- [10] Loop C. Smooth subdivision surface based on triangles [MS. Thesis]. Salt Lake City: University of Utah, 1987.
- [11] Lee A, Moreton H, Hoppe H. Displaced subdivision surfaces. In: Akeley K, ed. Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 85–94.
- [12] Liu Y, Cai KY, Wang WC, Wu EH. Progressive out-of-core compression based on reconstruction with M arching cubes. Chinese Journal of Computers, 2004,27(11):1457–1463 (in Chinese with English abstract).
- [13] Li H, Li M, Prabhakaran B. Middleware for streaming 3D progressive meshes over lossy networks. ACM Trans. on Multimedia Computing, Communications and Applications, 2006,2(4):282–317.
- [14] Agu E, Banerjee K, Nilekar S, Reutun O, Kramer D. A middleware architecture for mobile 3D graphics. Int'l Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 2006,21(3):183–197.
- [15] Luo XN, Zheng GF. Progressive meshes transmission over a wired-to-wireless network. ACM Journal of Wireless Networks(WINET), 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-006-7603-1>
- [16] Bartels RH, Samavati FF. Reversing subdivision rules: Local linear conditions and observations on inner products. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000,119(1–2):29–67.
- [17] Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, Schröder P. Normal meshes. In: Akeley K, ed. Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 95–102.
- [18] Shapiro JM. Embedded image-coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993,41(12):3445–3462.
- [19] Said A, Pearlman W. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Trans. on Circuits and System for Video Tech., 1996,6(3):243–250.
- [20] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring error on simplified surfaces. Computer Graphics Form, 1998,17(2):167–174.

附中文参考文献:

- [12] 刘迎,蔡康颖,王文成,吴恩华.基于 Marching Cubes 重组的外存模型渐进压缩.计算机学报,2004,27(11):1457-1463.



马建平(1963—),女,辽宁东港人,博士,高级工程师,主要研究领域为移动计算,三维 CAD 和数字家庭技术.



陈渤(1962—),男,高级工程师,主要研究领域为嵌入式软件,网络通信.



罗笑南(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为数字家庭技术,移动计算,CAGD,三维 CAD 仿真.



李峥(1977—),男,博士生,主要研究领域为网格变形,人体建模.

关于推荐 2009 年 CCF 优秀博士学位论文的通知

为推动中国计算机领域的科技进步,鼓励创新性研究,激励计算机领域的博士研究生潜心钻研,务实创新,解决计算机领域中需要解决的理论和实际问题,使做出优秀成果的年轻学者获得同行认可并有成就感,中国计算机学会(CCF)自 2006 年起设优秀博士学位论文奖.2009 年度优秀博士学位论文推荐工作即日启动,现将有关内容通知如下:

1. 参评条件

- 1) 本次优秀博士学位论文的评选范围为 2007 年 7 月 1 日—2009 年 6 月 30 日期间在中国获得计算机科学与技术学科相关专业博士学位的学位论文;
- 2) 参加评选的博士学位论文须经具有计算机科学与技术学科博士点的高校计算机学院(系)或研究机构推荐,每个具有一级学科博士点单位推荐参评学位论文不超过 2 篇,其他不具有一级学科博士点的单位限推荐 1 篇,已经参评过的论文不得再被推荐。
- 3) 具体参评条件和约束条件见“CCF 优秀博士学位论文奖条例”(http://www.ccf.org.cn 之关于 CCF/规则与条例)

2. 参评申报材料

- 1) 印刷论文 2 本;
- 2) 电子版论文 1 份;
- 3) CCF 优秀博士学位论文推荐表(必须有作者答辩时所在单位(如系、院、所等)负责人签字、单位盖章,可在 <http://www.ccf.org.cn/web/resource/tujianbiao.doc> 下载);

4) 其他有关证明材料;

5) 评审费: 1000 元/篇(CCF 会员 800 元/篇)。

3. 申报材料和评审费须于 2009 年 9 月 15 日 17:00 前报送到 CCF, 过期无效。

4. 评选时间安排

- 1) 受理: 2009 年 7 月 8 日—2009 年 9 月 18 日
- 2) 格式和资质审查: 2009 年 9 月 19 日—9 月 25 日
- 3) 初评: 2009 年 9 月 26 日—10 月 28 日
- 4) 初评公示: 2009 年 11 月 2 日—11 月 16 日
- 5) 终评: 2009 年 11 月 17 日—11 月 26 日
- 6) 终评公示: 2009 年 11 月 27 日—2009 年 12 月 11 日