

# 三维网格压缩方法综述<sup>\*</sup>

蔡 苏 赵沁平

(北京航空航天大学计算机学院 北京 100083)

**摘 要** 针对三维网格大数据量与三维图形引擎处理能力及网络带宽限制之间的矛盾,三维网格压缩编码技术提供了一系列解决方法。本文从静态压缩和递进网格两个角度分类,以拓扑信息驱动和几何信息驱动为两条主线,归纳比较了国内外近十年来三维网格压缩的各种方法,并给出其未来发展趋势。

**关键词** 三维网格压缩,静态压缩,递进网格

## A Review on 3D Mesh Compression

CAI Su ZHAO Qin-Ping

(School of Computer Science & Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract** To solve the conflict between the huge data of the 3D mesh and the power of the graphics engines and the limit of the network bandwidth, 3D mesh compression technique provides a series of approaches. This paper introduces and compares the 3D mesh compression technologies developed over the last decade, classifying it into two schemes: single-rate and progressive, and proposing two cues: topology-driven and geometry-driven. Finally, we probe into the trends in 3D mesh compression.

**Keywords** 3D mesh compression, Static compression, Progressive mesh

## 1 引言

当前各种高级造型工具的不断涌现和三维外形扫描数据技术的日益成熟使得人们对几何数据的精度和细节都提出了更高的要求,这同时也导致了三维几何数据的规模和复杂程度急剧增长。庞大的几何数据量对现有的三维图形引擎的处理能力和速度提出了巨大的挑战。另一方面,Internet 的迅猛发展也使得三维几何数据的应用越来越广泛。但是网络带宽的限制严重阻碍了这种媒体的传播。如果仅仅依靠增加硬件设备的投入是不足以解决这一问题的,需要人们研究针对三维几何数据的压缩编码技术。

针对三维数据,目前有两个国际标准:第一个是 VRML<sup>[1]</sup>/X3D<sup>[2]</sup>和 MPEG-4<sup>[3]</sup>,前者是网络上的三维图形规范,后者包含一种三维网格编码 3DMC,其整合了递进三维网格压缩、非流形网格编码、误差评测等方面。

通常一个多边形网格分为三部分:拓扑信息(Connectivity data)、几何信息(Geometry data)和属性信息(Property data)。拓扑信息指多边形网格的顶点之间连接关系;几何信息描述的顶点的位置坐标;属性信息通常包含几何体表面法向量、纹理、材质等信息。本文主要论述针对前两部分的压缩方法。

从压缩方法来看,三维网格压缩可分为静态压缩方法和递进网格压缩方法。从发展趋势看,编码方法逐渐从以前的以拓扑结构驱动的编码方式转为以几何信息为驱动的编码方式。本文将从静态和递进两大类方法分别阐述,并以拓扑驱动和几何驱动两条主线贯穿两大类方法。

## 2 静态压缩编码

早期的三维网格压缩主要解决 CPU 和图形显卡之间的

传输瓶颈,因此是一种静态编码。最初的压缩是针对三维模型中的拓扑结构信息。

### 2.1 拓扑驱动压缩

(1)索引面 这种方式实际就是 VRML 文件的存储格式,即将 mesh 分为独一无二的顶点和按顶点索引排列的三角形序列,如图 1 所示。它本身并没有对网格进行压缩,是一种最原始的三角形存储结构。

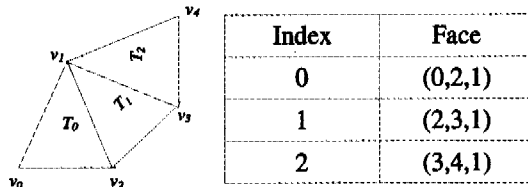


图 1 索引面

(2)三角形带 Deering<sup>[4]</sup>将三角形序列分为星形三角形带、锯齿形三角形带以及混合三角形带序列,如图 2 所示。尽管在存储空间与传输带宽上,三角形带比索引面小,但是效率并不高。三角形带可以适用于任意拓扑结构的网格,但它只对长条形三角形带最有效。

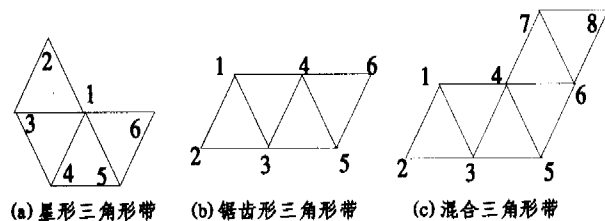


图 2 三角形带

<sup>\*</sup>北京市奥科委“虚拟奥运博物馆”。蔡 苏 博士研究生,主要研究领域为计算机图形学、虚拟现实。赵沁平 教授,博导,主要研究领域为虚拟现实、分布式应用系统、人工智能。

(3)生成树(Spanning Tree) 树中每两个节点(node)的入度不为2的段定义为一个“run”,一个run可以用三位来表示:第一位表示run的长度;第二位表示下一个run是否以该node开头;第三位表示当前run的终点是否是根节点。Taubin和Rossignac<sup>[5]</sup>提出的这种算法类似剥橘子的过程,最大化了run的长度,最小化了run的个数。该算法能处理任意亏格、带边界以及不可定向网格。

(4)层分解<sup>[6]</sup> 将网格分解成为若干同心的顶点层,在相邻两个顶点层之间构造三角片层。利用全部顶点层的数量,每个顶点层的布局以及每个三角片层的面片布局来表达整个网格的连通性。与Taubin和Rossignac的算法相比,它的不同在于:①不合并顶点层到顶点树;②不需要较大内存;③适合非流形网格。

(5)基于顶点入度的编码<sup>[7~9]</sup> 根据顶点的入度原则来编码,是目前为止压缩比最大的一种算法,但是只适合可定向和流形网格。

## 2.2 几何驱动压缩

目前拓扑结构编码在压缩率上接近理论极限,而几何编码在过去的研究中较少被关注。顶点的位置坐标,一般以单精度的浮点数形式存放,但是对于一个实际的几何模型来说,浮点数中占据8位的指数部分可以统一存储在对象的变换矩阵之中,这样顶点只需要24位定点小数表示即可。而且从人体视觉上看,实际也不需要这样高的精度表示。因此对几何数据的压缩通常是一种有损压缩。几何编码的三个步骤通常是:量化顶点位置,预测,熵编码。不同的几何驱动编码方式通常是预测方法的不同。

(1)Delta预测<sup>[4,10]</sup>:通常相邻顶点坐标值之间的差别是很小的,针对顶点坐标的差值进行编码,能够节省存储开销。

(2)线性预测<sup>[7,11]</sup>:实际上是delta预测的推广。它采用顶点生成树的方法,使当前顶点与其所有上层顶点都相关,如式(1)所示。

$$v_n = \sum_{i=1}^K \lambda_i \cdot v_{n-1} + \epsilon(v_n) \quad (1)$$

其中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K$  满足使得式(2)最小

$$E\{P\epsilon(v_n)P^2\} = E\{Pv_n - \sum_{i=1}^K (\lambda_i \cdot v_{n-1})P^2\} \quad (2)$$

在式(1)中当 $K=1$ 且 $\lambda_1=1$ 时就是delta预测。

(3)平行四边形预测<sup>[7]</sup>:使用平行四边形 $r = v + u - w$ 加上面之间的夹角 $\theta$ 来预测当前顶点的位置,如图3所示。

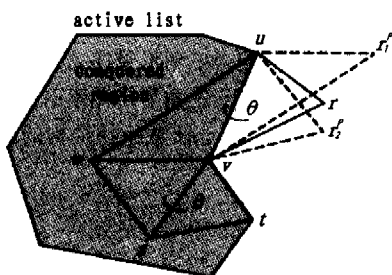


图3 平行四边形预测

(4)二次预测<sup>[6]</sup>:实际上是delta预测加上量化的delta熵编码,本质上仍是一种线性预测。

## 3 递进压缩

通常递进编码在编码效率上不如静态编码,因为它不能随意利用网格数据之间的相关性。但是随着三维数据的不断

增长以及网络图形的不断应用,原先的download-and-play的模式不能被用户接受,所以这种先传输并显示一个较低精度模型的粗网格,再边传输边显示精细细节的编码方式成为近年来的研究热点。递进压缩编码与网格简化(mesh simplification)比较相似,但是比其复杂。以往的递进编码往往是以拓扑结构编码为主,最近由几何信息驱动拓扑信息的编码方式逐渐成为关注的一个方向。

### 3.1 拓扑驱动压缩

(1)递进网格 Hoppe在1996年首先提出递进网格(Progressive Mesh, PM)的算法<sup>[12,13]</sup>,以边折叠和点分裂为基本操作,记录了基模型和一系列逐步求精的恢复操作信息,从而将任意拓扑网格表示为一种无损且连续的编码方式。基于Hoppe的工作,又有很多人做了延续性的扩展研究。如下:

① Progressive Simplicial Complex (PSC)<sup>[14]</sup>。解决了PM的两个限制:只能处理流形且可定向网格;在化简和恢复的过程中不能改变网格拓扑结构类型。

② Progressive Forest Split (PFS)<sup>[15]</sup>。Taubin在1998年提出一种森林分裂的编码方式,一次可以处理多个三角形。PFS是MPEG-4 3DMC中的一种可选网格编码方式。

③ Compressed Progressive Mesh (CPM)<sup>[16,17]</sup>。由Pajarola和Rossignac在2000年提出。CPM的顶点分裂是批处理的,对每一个批处理,CPM计算和传输在重构Huffman编码表时的Laplacian分布的差别信息,这样不必传输表本身,节省了传输开销。

④ 基于视点的递进网格。1996年,C. Xia<sup>[18]</sup>提出一种实时的基于视点的三角网格模型简化算法。Hoppe也于1997年对自己的PM算法进行改进<sup>[19]</sup>,定义了一个视锥模型表面法向和屏幕空间几何误差的准则(视锥准则、面朝向准则和几何误差准则),并利用此准则进行选择性的边折叠和点分裂。

(2)着色编码 Patch Coloring D. Cohen-Or<sup>[20]</sup>等人利用着色技术设计了另一种压缩格式的递进编码。通过顶点删除操作把几何模型表示成一个基网格,再通过着色的方法对原始网格上的小区域进行批量插入操作,如图4所示。由于顶点删除后形成很多空洞,重新三角化是一个费时的操作,所以这种算法速度较慢。

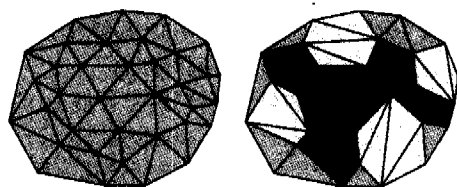


图4 顶点着色

(3)入度编码 Valence-based Touma<sup>[21]</sup>首先提出利用顶点的入度值对网格拓扑信息进行编码。在网格上任选一个初始三角形,用该三角形的三个顶点构造循环顶点链表,并取某顶点为焦点,按逆时针顺序处理焦点上的所有入边。在入度算法中设置了三个命令:add,split,merge。P. Alliez等人分析,在入度编码算法中split命令如果很多,该命令中的offset参数严重影响了入度编码的效率。因此P. Alliez等人提出一种入度驱动(Valence-Driven)的网格编码算法<sup>[22]</sup>,减少split命令的个数以及offset参数的分布范围,从而获取更高的压缩效率。

(4)增量几何压缩 刘新国<sup>[23]</sup>提出了增量几何压缩,该

算法。首先递归地以区域扩张的方式将模型分解为一系列的层结构,然后利用层间的连贯性及对层结构的有效编码,实现了高效的拓扑压缩。在拓扑压缩基础上,他最终实现了一个高效的渐进式几何模型压缩及传输方法。该方法:①能够直接处理任意复杂的三角形网格表示的几何模型。②首先一次性传输所有的拓扑信息,然后渐进式地传输几何信息。③利用拓扑信息为模型建立一个渐进式层次结构。④基于曲面光束的思想,对细节集中的顶点进行整体预测。该渐进式几何传输算法不需要为编码网格的层次结构而消耗额外数据,因此大大地提高了压缩效率。但是其缺点是需要一开始就传送完整的网格拓扑信息。

作为几何信息压缩的基础,拓扑压缩算法应该能够生成质量高的简化模型,简化模型质量越好,几何压缩效率越高。因此这是一种拓扑驱动的压缩算法。

### 3.2 几何驱动压缩

(1) Kd-tree Decomposition 2002年 Gandoin 和 Deviliers<sup>[24]</sup>打破了传统的拓扑信息驱动几何信息的编码,提出了一种几何驱动拓扑的新的编码方式。该算法基于子分过程<sup>[25]</sup>的 Kd-tree 分解,分为两步:①只考虑几何数据递进编码;②在两个连续的 LOD 之间对拓扑结构变化进行编码。该算法适用任意拓扑结构,特别适合地形数据和密集采样数据,并能很容易扩展到四面体网格(tetrahedral meshes)。

(2) Octree Decomposition Peng 和 Kuo 在 2005 年 Siggraph 上提出的一种基于八叉树(Octree)的递进无损编码<sup>[26]</sup>。该算法采用自顶向下的方式编码变化信息。其中几何编码没有在每个 cell 里面编码顶点的个数,而是编码顶点在 cell 里的存在性,这样编码更加简洁。而拓扑编码除对非空子树编码外,还对非空子树与父节点的邻节点编码。这种编码方式比 Kd-tree 方法有效且很容易扩展到多边形网格。

(3) 扩展频域编码 在数字图像处理领域,通常通过 DFT 或 DCT 等变换方法将二维图像转换到频率域,由于能量通常集中在低频,可以将高频信号忽略而只编码低频信号,这样能达到很大的压缩比<sup>[27]</sup>。这种压缩格式非常适合在网络上对几何进行渐进式传输:即先传几何的低频系数,再传送高频系数。Taubin 在 1995 年 Siggraph 会议上首先提出了三维网格的频谱理论<sup>[28]</sup>。基于这一理论,Karni 和 Gotsman 在 2000 年 Siggraph 会议上提出三维几何网格的频域压缩方法<sup>[29]</sup>。该方法对每一个顶点进行排列,形成一个  $n \times n$  的 Laplacian 矩阵。如式(3)所示。

$$L_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } i=j, \\ -1/d_i & \text{if vertices } i \text{ and } j \text{ are adjacent,} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

该矩阵的特征向量形成了一个  $R^n$  上的正交基,相应的特征值代表了这些基方程的频率。然后将网格的  $x, y, z$  的坐标向量分别投影到基方程上获得几何信息频谱。这样提取低频系数并对系数进行量化编码,达到了很好的压缩效果。它的本质是傅立叶变换域上的压缩。但是找到这样一个  $n \times n$  矩阵的特征向量需要  $O(n^3)$  的时间计算复杂度。可使用分块的方法解决计算复杂度,但是解码时仍然计算量大,不能实时。

在频率域编码中还有一种研究得比较热的方法,即小波编码。它是一种子分网格编码也称为半规则网格编码。Khodakovsky 于 2000 年提出的算法去掉了参数化信息,使用子分小波变化和零树编码(Zerotree Coding)压缩几何信息<sup>[30]</sup>。2003 年 Khodakovsky 又证明了该算法结合法向网格<sup>[31]</sup>可达到更高的压缩率<sup>[32]</sup>。该算法的理论基础是子分小

波,很多数字几何处理应用在这个框架下可以很高效地实现。但是这种方法的连续性很难证明,并且不能处理几何信号的某些低频分量。

(4) 几何图像编码 Gu 在 2002 年提出一种新的三维几何模型的表示方法——几何图像(Geometry Image)<sup>[33]</sup>。任意网格首先被自动切割成单独一片开网格,这个开网格被参数化到一个单位矩形里。所有网格表面信号如顶点位置、法向量和颜色都可被均匀采样成图像,如图 5 所示。然后使用传统图像压缩方法来压缩。

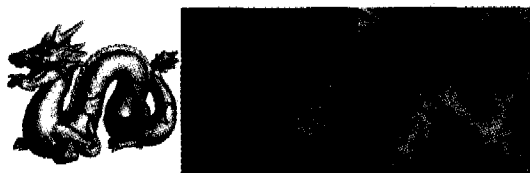


图 5 原始模型切割路径,顶点位置图像和法向量图像

由于构造几何图像需要对原模型做复杂切割,这样带来的切割边界会限制它在很多领域的应用,比如信号滤波就不能直接采用图像滤波技术。

(5) 球面调和编码 周昆在 2002 年提出一种全局参数化算法<sup>[34]</sup>,该算法为任意网格模型构造一个球面参数化网格。定义在原模型表面上的属性被转化为定义在球面上的信号,这些信号可以采用经典正交分析工具来分析处理,所有成熟的数字图像处理技术都可以在该框架下实现。



图 6 球面参数化及处理过程

**总结及发展趋势** 不管是静态压缩还是递进网格压缩,基于顶点入度的压缩方法都是目前性能最好的一种方法。但是近年来基于几何信息压缩的 Kd-tree, Octree 的编码方式成为研究热点。在早期,几何编码都是依赖于拓扑编码,现在这种依赖性正不断减弱,并且现在拓扑编码几乎接近理论极限。而在一个模型文件中,几何数据占据了大部分的存储空间,这当中应有更多的扩展空间。另外递进网格压缩中从一个基网格重构原始模型,现在更多采用规则重采样(resample regularly)技术,这样在几何数据压缩的时候,拓扑信息甚至可以忽略不计。

静态压缩方式除了在几何编码上可能还有一定的利用空间外,应该算是一种比较成熟的编码方式。相比之下,递进网格压缩可能在编码直接收益上不及静态压缩,但是这种边解码边显示的模式更为用户所接受,而且某些优秀的递进编/解码器在 Rate-Distortion 性能上接近甚至超过最好的静态压缩编/解码器。递进压缩的可发展方向可能在如何使用更少的计算开销上。

本文主要针对静态的三角形网格这种比较常用的网格表示形式,实际上未来的三维网格编码可能更多地关注于以下方面:

(1) 多边形网格压缩<sup>[35~39]</sup>。大多数网格压缩算法都是针对三角形网格。三角形网格压缩存在以下缺点:①将非三角

形网格三角化需要额外开销②压缩过程有可能损失原始信息③某些属性信息可能需要重复编码。直接对多边形网格压缩能克服以上缺点,并且不需要对网格进行预三角化。

(2)体素网格压缩<sup>[40,41]</sup>。四面体网格(Tetrahedral meshes)很适合表示非规则采样数据以及对其进行多分辨率分析和可视化排序。这种表示方法在医学诊断数据的表示和物理现象仿真上应用得较多。四面体网格和三角形网格类似有两个表:①顶点表;②四面体表。由于特定应用领域的需要,体素网格往往占据巨大的存储空间,因此研究体素网格的压缩也是很有必要的。

(3)等值面压缩<sup>[42,43]</sup>。等值面的表示方法在三维摄影(3D photography),科学可视化(scientific visualization),磁共振图像(magnetic resonance imaging, MRI),医学上的 computed tomography (CT)有广泛的应用。目前未结构化的体素数据的压缩还是一个尚未涉及的领域。

(4)动画网格压缩<sup>[44,45]</sup>。三维动画尤其是三维虚拟人目前是一个引人瞩目的领域。在分布式虚拟环境中,随着三维虚拟人的导入数量不断增加,其对CPU、内存、图形显卡及网络带宽的要求越来越高,需要一种有效的方法压缩三维虚拟人及动作数据。

(5)动态场景压缩<sup>[46]</sup>。大多数三维压缩方法针对单一模型,然而三维数据还包括三维场景。在复杂的三维场景中存在各对象之间遮挡关系、与用户交互性更强、静态对象与动态对象并存。如何压缩并在网络上有效传输这样复杂的三维场景也是研究工作者必须面对的一个问题。

另外如法向量网格(Normal mesh)、基于点采样及绘制网格(Point-based geometry)等也逐渐成为三维网格压缩研究的对象。

## 参 考 文 献

- ISO/IEC 14772-1. The Virtual Reality Modeling Language (VRML), 1997
- ISO/IEC 19775:200X, Extensible 3D(X3D), 2003
- ISO/IEC 14496-2, Coding of Audio-Visual Objects: Visual, July 2001
- Deering M. Geometry compression. In: ACM SIGGRAPH, 1995. 13~20
- Taubin G, Rossignac J. Geometric compression through topological surgery. ACM Trans. Graphics, 1998, 17(2): 84~115
- Bajaj C L, Pascucci V, Zhuang G. Single resolution compression of arbitrary triangular meshes with properties. Computational Geometry: Theory and Applications, 1999(14): 167~186
- Touma C, Gotsman C. Triangle mesh compression. In: Proc. Graphics Interface, 1998. 26~34
- Schindler M. A fast renormalization for arithmetic coding. In: Proceedings of IEEE Data Compression Conference, 1998. 572
- Alliez P, Desbrun M. Valence-driven connectivity encoding for 3D meshes. In: EUROGRAPHICS, 2001. 480~489
- Chow M. Optimized geometry compression for real-time rendering. In: IEEE Visualization, 1997. 347~354
- Taubin G, Rossignac J. Geometric compression through topological surgery. ACM Trans. Graphics, 1998, 17(2): 84~115
- Hoppe H. Progressive meshes. In: ACM SIGGRAPH, 1996. 99~108
- Hoppe H. Efficient implementation of progressive meshes. Computers and Graphics, 1998, 22(1): 27~36
- Popovic J, Hoppe H. Progressive simplicial complexes. In: ACM SIGGRAPH, 1997. 217~224
- Taubin G, Gueziec A, Horn W, Lazarus F. Progressive forest split compression. In: ACM SIGGRAPH, 1998. 32: 123~132
- Pajarola R, Rossignac J. Compressed progressive meshes. IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(1): 79~93
- Pajarola R, Rossignac J. Squeeze: Fast and progressive decomposition of triangle meshes. In: Proc. of Computer Graphics Intl. Conf. 2000. 173~182
- Xia J C, Varshney A. Dynamic view-dependent simplification for polygonal models. In: Proc. of the Visualization'96, 1996.
- Hoppe H. View-Dependent refinement of progressive meshes. In: Proc. of the Computer Graphics, SIGGRAPH'97, 1997
- Cohen-Or D, Levin D, Remez O. Progressive Compression of Arbitrary Triangular Meshes. In: IEEE Visualization'99. Oct, 1999
- Touma C, Gotsman C. Triangle Mesh Compression. Proceedings Graphics Interface 98, 1998. 26~34
- Alliez P, Desbrun M. Valence-Driven Connectivity Encoding for 3D Meshes. EG 2001
- 刘新国. 三维几何压缩. [博士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2001
- Gandoin P M, Devillers O. Progressive lossless compression of arbitrary simplicial complexes. ACM Trans. Graphics, 2002, 21(3): 372~379
- Devillers O, Gandoin P. Geometric compression for interactive transmission. In: IEEE Visualization, 2000. 319~326
- Peng J, Kuo C C J. Geometry-guided progressive lossless 3D mesh coding with octree (OT) decomposition. Appear to SIGGRAPH'05
- Jayant N S, Noll P. Digital Coding of Waveforms - Principles and Applications to Speech and Video. Prentice Hall, 1984
- Taubin G. A signal processing approach to fair surface design. In: ACM SIGGRAPH, 1995. 351~358
- Karni Z, Gotsman C. Spectral compression of mesh geometry. In: ACM SIGGRAPH, 2000. 279~286
- Khodakovsky A, Schröder P, Sweldens W. Progressive Geometry Compression. In: SIGGRAPH 2000 Proceedings, 2000. 271~278
- Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, Schröder P. Normal Meshes. In: ACM Siggraph, 2000
- Khodakovsky A, Guskov I. Compression of Normal Meshes. In: Geometric Modeling for Scientific Visualization. Springer-Verlag, 2003
- Gu X, Gortler S J, Hoppe H. Geometry images. In: ACM SIGGRAPH, 2002. 355~361
- 周昆. 数字几何处理: 理论与应用. [博士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2002
- King D, Rossignac J, Szymczak A. Connectivity compression for irregular quadrilateral meshes. [ Technical Report TR-99-36]. GVU, Georgia Tech (1999)
- Isenburg M, Snoeyink J. Face fixer: Compressing polygon meshes with properties. In: ACM SIGGRAPH, 2000. 263~270
- Lee H, Alliez P, Desbrun M. Angle-analyzer: A triangle-quad mesh codec. In: EUROGRAPHICS, 2002. 383~392
- Isenburg M. Compressing polygon mesh connectivity with degree duality prediction. In: Proc. Graphics Interface, 2002. 161~170
- Khodakovsky A, Alliez P, Desbrun M, Schröder P. Near-optimal connectivity encoding of 2-manifold polygon meshes. Graphical Models. Special Issue on Compression
- Szymczak A, Rossignac J, Grow & fold: Compression of tetrahedral meshes. In: Proc. of the 5th Symposium on Solid Modeling and Applications, ACM Press, 1999. 54~64
- Gumhold S, Guthe S, Straßer W. Tetrahedral mesh compression with the cut-border machine. In: IEEE Visualization, 1999. 51~58
- Saupe D, Kuska J-P. Compression of isosurfaces for structured volumes. In: Proc. of Vision, Modeling and Visualization, 2001. 333~340
- Zhang X, Bajaj C, Blanke W, Fussell D. Scalable isosurface visualization of massive datasets on cots clusters. In: Proc. of IEEE Symposium on Parallel and Large Data Visualization and Graphics, 2001. 51~58
- Zhang J, Owen C B. Octree-based animated geometry compression. In: Proc. of IEEE Data Compression Conference, 2004. 508~517
- Zhang J, Owen C B. Hybrid coding for animated polygonal meshes: Combining delta and octree. In: Proc. of IEEE International Conference on Information Technology, 2005
- Teler E. Streaming of Complex 3D Scenes for Remote Walk-throughs. [ Master thesis]. The Hebrew University of Jerusalem, Israel, 2001