

基于小波变换的非渐进网格压缩

刘波 张鸿宾 王宝

(北京工业大学计算机学院, 北京 100022)

摘要 为了取得较好的三角形网格压缩性能,提出了一种基于小波变换的三角形网格非渐进压缩方法。该压缩方法先利用重新网格化来去除大部分连接信息,然后利用小波变换的强去相关能力来压缩几何信息。在进行重新网格化和小波变换后,再按一个确定的次序将所有的小波系数扫描为一个序列,然后对其做量化和算术编码。另外,对重新网格化得到的自适应半正规采样模式,还设计了一种自适应细分信息编码算法,以便使解码端知道每一个小波系数应该放置在哪个顶点上。实验表明,用该压缩方法对由三维扫描仪获取的复杂网格进行压缩,取得了比 Edgebreaker 方法明显要好的率失真性能;10比特量化时,压缩倍数在200倍左右,为 Edgebreaker 方法的2倍多。

关键词 三角形网格 非渐进压缩 小波变换

中图分类号: TN919.81 TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)11-1356-06

Non-progressive Mesh Compression Based on Wavelet Transform

LIU Bo, ZHANG Hong-bin, WANG Bao

(Computer Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract A non-progressive triangle mesh compression method based on wavelet transform is proposed in this paper. It uses remeshing to remove most of the connectivity information, then uses wavelet transform to compress the geometry information by taking advantage of its strong decorrelation power. After remeshing and wavelet transform, all wavelet coefficients are scanned in a determined way to form a sequence, then quantized and arithmetic encoded. For the adaptive semi-regular sampling pattern obtained by remeshing, in order for the decoder to know at which vertex each wavelet coefficient locates, an adaptive subdivision information coding algorithm is also designed. Experimental results show that the proposed method has achieved better rate-distortion performance than the well-known Edgebreaker method, and the compression ratio is about 200:1 for complex meshes acquired by 3D scanner under 10 bits quantization, which is more than 2 times of that of Edgebreaker method.

Keywords triangle mesh, non-progressive compression, wavelet transform

1 引言

三角形网格是计算机图形学中最常用的一种三维物体表示方式。随着三维扫描技术的进步,网格数据开始大量被应用。由于网格的数据量通常都比较大,因此有必要进行有效的压缩,以减少对存储空间和网络带宽的要求。三角形网格数据压缩^[1]的研究与图像压缩、视频压缩的研究相比,还是一个较新的课题。

一个三角形网格包含的信息可分为连接信息和

属性信息两类。其中连接信息是指顶点间的连接关系;属性信息是指每个顶点的各种属性,主要包括顶点的几何坐标(称为几何信息)以及颜色、法向、纹理坐标等用于图形绘制的信息。

当前三角形网格压缩的研究主要分为渐进(progressive)与非渐进(non-progressive)压缩两大方向,其中非渐进压缩,或称单一比特率(single-rate)压缩,是指将原始输入网格压缩成具有单一目标比特率的码流,解码时,解码器需要拥有整个压缩码流才能解码出原始网格;而渐进压缩是指将原始

输入网格压缩成具有多个目标比特率的码流,解码时,可以只用码流的一部分进行解码,其相应的重构网格则为原始网格的一个近似。

目前各种非渐进压缩方法的基本思路都比较类似,即在压缩连接信息时,首先采用某种遍历方法对网格进行遍历,并将遍历的结果表示成某种符号序列,然后再对这个符号序列进行熵编码;而在压缩几何信息时,则先对每个顶点用遍历路径上的相邻顶点来进行预测,以去掉相邻顶点坐标间的相关性,然后对预测误差进行熵编码。Edgebreaker 方法^[2,3]和 TG 方法^[4]是目前非渐进压缩方法中压缩性能较好的两种代表性方法。

本文提出一种基于小波变换的非渐进压缩方法。如果基于小波变换来做压缩,那么其对连接信息而言,重新网格化可以去掉大部分连接信息;对几何信息而言,由于小波变换具有很强的去相关能力,即小波变换后大部分小波系数的值集中在零附近,有利于进行熵编码,因此,利用小波变换来做非渐进压缩应该可以取得很好的压缩性能。为了实现压缩,在重新网格化和小波变换后,本文先将所有的小波系数按一个确定的次序串联起来,然后做量化和熵编码,但问题在于,在解码时,对重新网格化后的自适应半正规网格,解码端需要知道解码后的小波系数串中的每一个值应该放在自适应半正规网格的哪一个顶点上。为实现这个目的,首先编码端和解码端对小波系数的串联顺序要有一个一致的默认规则,因为这样可尽量避免传送额外的小波系数的位置信息,本文为此设计了一种小波系数的遍历算法,并按遍历次序将小波系数串联起来;其次,由于重新网格化的自适应性,即不同区域的细分(subdivision)次数可能不同,因此本文设计了一种编码自适应细分信息的算法,以使解码端知道自适应半正规网格的细分情况。

2 编码和解码

由于现有的网格小波变换只适用于半正规网格,因此必须要将通常的非正规网格进行重新网格化,使非正规网格转化为半正规网格后再进行小波变换,而小波变换则将产生一个基网格和几个小波子带。本文采用单一比特率压缩方法来压缩非正规的基网格,而各个子带的小波系数则先被扫描串联成一维序列,然后再做量化和算术编码。

2.1 重新网格化与小波变换

虽然小波变换在信号和图像处理中的应用已较为成熟,但在网格压缩和处理中的应用还处于初级阶段。对网格而言,由于顶点间的连接关系一般是不规则的,从而使得在一般的非正规网格上建立小波分析非常困难。Lounsbery 开创了半正规网格上的小波分析^[5]。通常一个半正规网格表示中包含了一系列不同分辨率的近似网格,且这些网格所在的线性空间之间存在嵌套关系,即 $V_0 \subset V_1 \subset \dots \subset V_n$, 其中 V_0 为基网格所在的空间, V_n 为最细一层网格所在的空间;小波变换则将一个半正规网格分解为基网格和一系列小波系数,其中小波系数表达了相邻层次之间的差别。Schroder 等人提出了基于提升(lifting)方案的半正规网格上的小波构造方法^[6],即对一组平庸的小波基进行提升,以得到具有某种特性的小波基。比如在提升的 Butterfly 小波中,先采用懒惰小波(lazy wavelet)来对 V_{j+1} 中网格的顶点进行下采样(subsampling),然后用那些在 V_j 中仍然保留的顶点来对其余顶点进行预测,预测值由 Butterfly 细分方案求出,而得到的预测误差就是小波系数,最后再用小波系数对那些保留顶点的坐标(即尺度系数)进行提升。Khodakovsky 等人提出了 Loop 小波^[7]。由于 Loop 小波是基于 Loop 细分的,与 Butterfly 小波不同的是,Butterfly 细分是一种插值(interpolating)方案,即原有的顶点在细分后坐标保持不变,而 Loop 细分是一种近似(approximating)方案,原有的顶点在细分后坐标会发生变化,以使网格表面更连续,因此,用 Loop 小波分解后的网格的视觉质量比用 Butterfly 小波要好一些,尽管两者的压缩效率差不多^[7]。

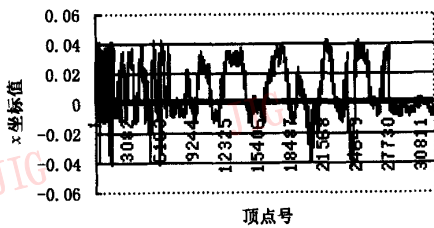
由于通常网格是非正规的,为了将非正规网格转化为半正规网格,以便进行小波分析,人们提出了一些重新网格化方法,如文献[8]提出的方法、MAPS (multiresolution adaptive parameterization of surface)^[9]方法、normal mesh^[10]方法以及文献[11]提出的方法等。本文采用 MAPS 方法来重新网格化。MAPS 方法是先通过网格简化来得到一个基网格,并将原始网格上的顶点映射到基三角形(base triangle)上,以建立起原始网格与基网格的映射关系;然后将每个基三角形做多级的一分四划分,再利用原始网格与基网格的映射关系,将一分四划分引入的基三角形上的新顶点映射到原始网格上来得到重新网格化后的新顶点的位置。由于重新网格

化是通过对各个基三角形做多级一分四划分而实现的,所以重新网格化后的网格为半正规网格。此外,为了使重新网格化后的网格与原始网格的误差控制在一定的范围内,MAPS 方法采用了自适应的一分四划分,即在细节比较丰富的区域,划分的级数比较多,而在平坦的区域划分的级数就少一些。

本文采用的小波变换是 Loop 小波^[7]。它在重构时采用了 Loop 细分,其重构公式为

$$P_{j+1} = [P \quad Q] \begin{bmatrix} p_j \\ d_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, p_j 和 d_j 分别为层次 j 的尺度系数(即顶点坐标)和小波系数。低通滤波器 P 由 Loop 细分确定,高通滤波器 Q 的选取请参看文献^[7]。小波分解时,



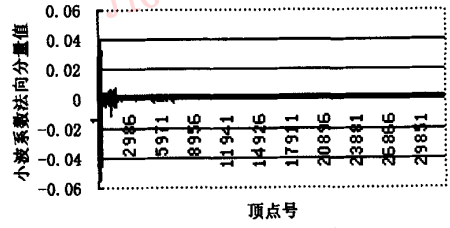
(a) 顶点坐标

在给定层次 $j+1$ 的顶点坐标 p_{j+1} 后,层次 j 的顶点坐标 p_j 和小波系数 d_j 可由稀疏线性方程组(式(1))求解而得。

图 1 所示为 horse 模型在小波变换前后,顶点坐标 x 分量和小波系数的法向分量的分布图,其中横轴为顶点序号。从图中可以看出,大多数小波系数的值明显接近于零,这充分体现了小波变换的强去相关能力,也有利于对小波系数进行熵编码。

2.2 基网格编码

基网格为一非正规网格,它的压缩编码可采用目前常用的一些的非渐进压缩方法。本文对基网格的连接关系采用 Edgebreaker 方法来压缩,并采用平行四边形预测来压缩基网格的顶点坐标。



(b) 小波系数

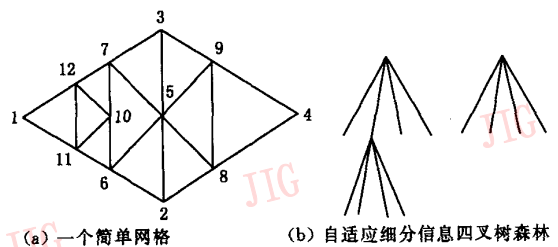
图 1 小波变换的去相关能力

Edgebreaker 方法具有压缩性能高,并存在确定的压缩比上限以及实现简单等优点。在编码连接关系时,Edgebreaker 方法一次访问一个三角形,且每当从某条边进入到一个未被访问过的三角形时,如果与该边相对的那个顶点没有被访问过,则输出符号 C (center),同时标记该顶点与该三角形为已访问,并且下一个操作就访问右边的相邻三角形;否则根据左、右两个相邻三角形被访问情况的 4 种可能组合,分别输出 L (left), R (right), S (split), E(end)等 4 个符号中的某一个,同时标记该三角形为已访问,并采取相应的下一个操作,即访问右边的相邻三角形、访问左边的相邻三角形、分叉或结束。这个遍历过程不断进行,直到所有的三角形都被访问过为止,最后再对所得的符号序列进行熵编码。由于这 5 种符号的概率分布很不均匀(其中 C 的概率约为 0.5),所以 Edgebreaker 方法可获得很好的连接信息压缩性能。关于顶点坐标的平行四边形预测可参看文献^[3,4]。

2.3 自适应细分信息编码

以图 2(a)所示的简单网格为例来阐述自适应细分信息编码和小波系数扫描。这个网格有 3 个子

带,其中子带 0 即基网格,由基三角形 $\triangle 123$ 和 $\triangle 243$ 组成;子带 1 的小波系数定义在顶点 5,6,7,8,9 等处;子带 2 的小波系数定义在顶点 10,11,12 等处。由于在子带 1 的所有三角形中,只有 $\triangle 176$ 进行了细分,因此解码端必须要知道子带 1 中每个三角形的细分情况,才能从小波系数序列中取出顶点 10,11,12 处的值后,将它们放置在三角形 $\triangle 176$ 的 3 条边上,而不会错误地放置在其他位置。这就需要进行自适应细分信息编码。



(a) 一个简单网格 (b) 自适应细分信息四叉树森林

图 2 自适应细分信息编码和小波系数扫描

本文用一位细分位来表示每个三角形是否进行了细分。这样整个半正规网格的自适应细分信息就可以表示为一个四叉树森林,其中每棵四叉树对应于一个基三角形,树的每个节点存储一位信息,根存

储的是基三角形的细分位,根的 4 个子节点存储的是基三角形的 4 个子三角形的细分位,依此类推。如果一个三角形没有进行细分,则它的细分位节点就不再有子节点。图 2(b)所示为图 2(a)网络的自适应细分信息森林。

对自适应细分信息二叉树森林,本文采用宽度优先遍历来将所有的细分位串联成一个序列。比如对于图 2(b)所示的森林,其得到的位序列为:11010000000000。由于基三角形和低层子带的三角形一般都进行了细分,在位序列的前面部分连续有很多位都为 1(表示进行了细分),但由于与叶节点对应的三角形都没有进行细分,在位序列的后面部分连续有很多位都为 0,因此,类似于行程编码,本文首先从位序列中移去这种连续的 0 或 1,并将它们的个数记录在码流中,然后对剩余的位序列进行算术编码^[12]。

2.4 小波系数扫描

下面描述如何将所有的小波系数串联成一个序列。本文采用了小波系数的宽度优先遍历方法,即从低频子带到高频子带,一个子带一个子带地进行扫描。在网格的情形中,由于小波系数是定义在边上的,因此可通过对一个子带的所有边进行遍历来扫描该子带的小波系数。算法的伪码如下:

(1) 置各个子带的所有三角形的 visited 标记为 False,并将所有基三角形依次加入到 TriangleQueue 的尾部,其中 TriangleQueue 为一先进先出的队列。

(2) While (TriangleQueue 不为空){

 Triangle=TriangleQueue. RemoveHead ();

 If (Triangle 存在子三角形){

 /* 依次考察 Triangle 的 3 条边上的小波系数是否已被访问过。*/

 For ($i=1; i \leq 3; i++$){

 If (与 Triangle 的第 i 条边相邻的另一个三角形的 visited 标记为 False)

 输出位于该条边上的小波系数。

 }

 置 Triangle 的 visited 标记为 True。

 将 Triangle 的 4 个子三角形依次加入到 TriangleQueue 的尾部。

 }

}

对图 2(a)所示网格,按上述算法扫描后,小波系数的排列为 5,7,6,8,9,10,11,12。这里需要指出的是,自适应细分信息二叉树森林的遍历次序和小波系数扫描次序在编码端和解码端应该是一致的。

2.5 量化和算术编码

对小波系数进行量化时,可以对每个子带采用不同的量化精度,比如,高频子带代表的是网格的细节信息,可以对高频子带的小波系数进行低精度量化,这样既可以提高压缩性能,又不明显增加失真,当然,也可以简单地对所有子带采用相同的量化精度。

大部分小波系数的值都在零附近分布,而量化则使小波系数的分布进一步集中,使用熵编码将可以有效利用这种分布的不均匀性来实现压缩。常用的熵编码方法有 Huffman 编码和算术编码。由于算术编码^[12]的压缩性能比 Huffman 编码略好,且无需事先知道输入符号的概率分布,因此本文采用了算术编码。此外,对前述的自适应细分信息的位序列,也只能用算术编码,而不能用 Huffman 编码来进行压缩。

2.6 解码

解码主要包括基网格解码、自适应细分信息解码、小波系数反扫描以及小波逆变换等步骤。它们分别是编码中相应过程的逆过程,本文不再详述。

3 算法复杂度分析

本文方法中,重新网格化、小波变换、小波系数扫描等是算法复杂度最高的几个步骤,其中重新网格化是预处理步骤,可离线(off-line)进行。小波系数扫描时,需要遍历所有的边,而对半正规网格,由于每一层的边数是上一层边数的 4 倍,所以多级小波分解得到的总边数为 $E \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4^2} + \dots \right)$,其中 E 是最细一层网格的边数;又因网格的边数 E 约为顶点数 N 的 3 倍,故最后可得出小波系数扫描的复杂度为 $O(N)$ 。对小波变换而言,Loop 小波在重构时,除细分引入的新顶点外,原有顶点的坐标也要重新计算,由于每一层的顶点数也是上一层顶点数的 4 倍,因此多级小波重构时需要计算坐标的顶点数为 $N \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4^2} + \dots \right)$,即 Loop 小波重构的复杂度也为 $O(N)$;Loop 小波分解则需要用双共轭梯度法(bi-conjugate gradient solver)^[7]来求解稀疏线性方程组(式(1))。实验表明,在 P4 2.6G 的机器上,对 horse 网格做 5 级 Loop 小波重构所需的时间为 0.4 s,5 级 Loop 小波分解所需的时间则为 3.4 s,由此可见,Loop 小波重构能做到实时,而 Loop 小波分解虽然

稍慢,但小波分解属于编码过程,其可离线完成。

4 实验结果

在实验中,作者将本文方法与同为非渐进压缩的 Edgebreaker 方法进行了比较。其中对 Edgebreaker 方法采用平行四边形预测来压缩几何信息。图 3 显示了实验中所用的一些网格数据^[13]。实验采用的小波变换是 Loop 小波,做了 5 级分解。表 1 列出了对这些网格分别用 Edgebreaker 方法和本文方法压缩后的比特率(bit rate),单位为 bits/vertex(b/v,每个顶点所需的比特数),其中本文方法的比特率是用原始网格的顶点数计算的,表中的压缩倍数是相对于 ascii 格式的原始文件大小而言的,小波系数采用了 10 比特均匀量化。

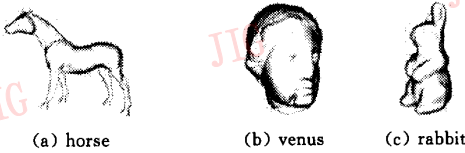


图 3 实验中所用的一些网格模型

从表 1 可见,本文方法的压缩性能比 Edgebreaker 方法明显要好。对于 horse 等通过三维扫描仪获取的复杂网格,本文方法的压缩比特率平均仅为 2.5 b/v 左右,约为 Edgebreaker 方法的 40%,压缩倍数在 200 倍左右,而且网格越大,压缩倍数越高。

表 1 本文方法和 Edgebreaker 方法的定量比较(10 bits 量化)

网格	顶点数	Edgebreaker 方法的比特率 (b/v)	本文方法的比特率(b/v)	本文方法的压缩倍数
horse	48 485	7.0	3.2	175
venus	134 345	6.1	2.0	292
rabbit	67 038	7.0	2.2	255

图 4 以 horse 网格为例,显示了本文方法与 Edgebreaker 方法的率-失真曲线,其中,各个不同的比特率由改变量化位数而得到,失真是相对于原始网格而言的,其可用 Metro 工具^[14]测量得到,并被扩大了 10⁴。从图 4 可见,在低比特率时,本文方法的率-失真性能明显要好于 Edgebreaker 方法,这表明在同样的解码质量下,本文方法压缩比明显高于 Edgebreaker 方法;在高比特率时,Edgebreaker 方法的失真趋于零,而本文方法的失真则趋于一个微小值,这个值就是重新网格化产生的失真。

图 5 显示了原始的 horse 模型以及 10 bits 量

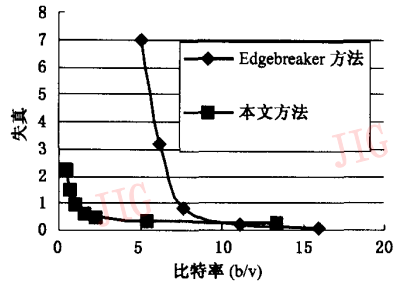


图 4 本文方法与 Edgebreaker 方法的比特率-失真性能比较



(a) 原始的 horse 模型 (b) 解码后的 horse 模型

图 5 原始的和解码后的 horse 模型

化时解码后的 horse 模型。与原始模型对比,人看不出有明显失真。

5 结论

本文提出了一种基于小波变换的三角形网格非渐进压缩方法。它是利用重新网格化来去掉大部分连接信息,并利用小波变换的强去相关能力来压缩几何信息。压缩时,在做小波变换后,先按一定的次序对所有的小波系数进行扫描,串联起来后再做量化和熵编码。对重新网格化后的自适应半正规采样模式,本文还设计了一种自适应细分信息编码算法。实验表明,本文方法的压缩效率比 Edgebreaker 方法明显要高。由于进行了重新网格化,因此本文方法的连接关系是有损压缩的。

参考文献

- 1 Taubin G, Rossignac J. 3D geometry compression [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'99, Course Notes 21 [C], Los Angeles, CA, USA, 1999.
- 2 Rossignac J. Edgebreaker: Connectivity compression for triangle meshes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(1): 47~61.
- 3 Rossignac J, Safonova A, Szymczak A. 3D compression made simple: Edgebreaker on a corner-table [A]. In: IEEE Shape Modeling International Conference [C], Genoa, Italy, 2001: 278

- ~283.
- 4 Touma C, Gotsman C. Triangle mesh compression [A]. In: Graphics Interface '98[C], Vancouver, B. C., Canada, 1998: 26~34.
 - 5 Lounsbery M, Deroose T, Warren J. Multiresolution analysis for surface of arbitrary topological type[J]. ACM Transactions on Graphics, 1997, 16(1): 34~73.
 - 6 Schröder P, Sweldens W. Spherical wavelets: Efficiently representing functions on the sphere [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'95[C], Los Angeles, CA, USA, 1995: 161~172.
 - 7 Khodakovskiy A, Schröder P, Sweldens W. Progressive geometry compression [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'00 [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 271~278.
 - 8 Eck M, Deroose T, Duchamp T, *et al.* Multiresolution analysis of arbitrary meshes [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'95 [C], Los Angeles, CA, USA, 1995: 173~182.
 - 9 Lee A, Sweldens W, Schröder P, *et al.* MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'98[C], Orlando, Florida, USA, 1998: 95~104.
 - 10 Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, *et al.* Normal Meshes [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'00 [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 95~102.
 - 11 Khodakovskiy A, Litke N, Schroder P. Globally smooth parameterization with low distortion [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'03 [C], San Diego, CA, USA, 2003: 350~357.
 - 12 Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression [J]. Communications of the ACM, 1987, 30(6): 520~540.
 - 13 PGC 软件包 [EB/OL]. <http://www.multires.caltech.edu/software/pgc/>, 2000.
 - 14 Cignoni P, Montani C, Rocchini D, *et al.* Metro: Measuring error on simplified surfaces [J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(2): 167~174.



刘 波 1975 年生, 1999 年获北京工业大学理论物理专业硕士学位, 现为北京工业大学计算机应用技术专业博士研究生。主要研究方向为计算机图形学、多媒体数据压缩。

E-mail: liubo@emails.bjut.edu.cn

张鸿宾 1944 年生, 1968 年清华大学自动控制系毕业, 1981 年清华大学模式识别与智能控制专业研究生毕业, 1986~1989 年为日本京都大学、1993~1994 年美国 RPI 高级访问学者。现为北京工业大学计算机学院教授、博士生导师。主要研究方向为模式识别、图像处理与机器视觉、人工神经网络以及数字水印。

王 宝 1978 年生, 2001 年获山东大学学士学位, 现为北京工业大学计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为计算机图形学。