

任意拓扑三角形网格的全局参数化

谭家万¹⁾ 金一丞¹⁾ 石教英²⁾

¹⁾(大连海事大学航海动态仿真交通部重点实验室, 大连 116026)

²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 提出了一种零亏格的任意拓扑流形三角形网格自动全局参数化方法. 算法首先采用顶点对合并的网格简化方法构造一个网格的累进表示, 在进行网格简化的同时, 对被删除的顶点相对于顶点合并操作所得到的新顶点的邻域进行局部参数化, 由此得到一个带局部参数化信息的累进网格; 然后将网格简化所得到的基网格进行中心投影到一个单位球面上, 并采用累进恢复的方法将删除的顶点按与删除时相反的顺序逐次添加回网格上来, 所添加顶点的坐标不再是其删除前的坐标值, 而是由局部参数化信息计算得到, 并且保证是位于单位球面上的. 由此得到原始网格的单位球面参数化网格.

关键词 计算机图形学(520·6030) 累进网格 网格参数化 网格分析

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)06-0686-06

Global Parameterization of Triangle Meshes with Arbitrary Topology

TAN Jia-wan¹⁾, Jin Yi-Cheng¹⁾, SHI Jiao-ying²⁾

¹⁾(Navigation Dynamic Simulation & Control Laboratory at Dalian Maritime University, Dalian 116026)

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG at Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Mesh parameterization is a primary task in many computer graphics applications, such as texture mapping, digital geometry processing and geometry compression, etc. This paper proposes a global parameterization method of meshes with arbitrary topology. For a given manifold triangle mesh with zero genus, it is firstly turned into a PM representation by means of edge collapse, the two vertices of the edge to collapse are locally parameterized over the neighborhood of the new vertex obtained through pair contraction. Edge collapse is iteratively carried out until a simple convex base mesh with local parameterization information is reached, then this base mesh is center projected onto a unit sphere, and vertices deleted during edge collapse are added back and positioned on the unit sphere according to the local parameterization information one by one with an inverse order which they are deleted until an isomorphic mesh of original mesh is produced. By this means, global parameterization over the unit sphere of the original mesh is completed. To avoid fold back, relaxation operator is adopted.

Keywords Computer graphics, Progressive mesh, Mesh parameterization, Mesh analysis

0 引言

在计算机图形学中, 通常采用代数曲面、参数曲面和多边形网格等形式来描述三维几何形体. 由于绝大多数图形绘制流水线对三角形的绘制具有较好的硬件支持, 因此, 三角形网格被广泛用以组织几何数据, 以实现快速绘制. 在数据分析和处理阶段, 采

用代数或参数描述形式往往可以使问题得以简化. 用统一的代数曲面来表示不规则三角形网格(TINs)不是一件容易的事, 因而人们更多地采用参数化表示形式, 这一过程称为三角形网格的参数化, 即求解三角形网格上的点和参数域内点的对应关系的过程. 有了网格的参数化表示, 对网格所需进行的分析和处理就可以在相应的参数域上进行. 由于参数域通常是欧氏空间 R^m (这里 m 表示网格的维数)

的一个子集,而欧氏空间又是大家所熟知的一种空间,因此分析数学在其上的许多成果在这里都可以直接加以应用,从而解决了定义在空间曲面上的信号分析和处理问题.正因为如此,许多计算机图形学应用都把网格参数化作为其首要的一步,如纹理映射、几何信号处理、曲面拟合以及网格重采样(remeshing)等.众所周知,亏格为零(G^0)的三角形网格 $M = \{V, F\}$ (这里将 M 表示为一个顶点表 V 和面表 F 组成的一个二元组,其中 V 中存储的是每个顶点的坐标值, F 则保存了组成面的顶点的索引号)与 S^2 (二维单位球面)是拓扑同胚的,带孔的 M 对应着带孔的 S^2 ,因此,一定存在 M 和 S^2 之间的同胚映射 $f: M \rightarrow S^2$ 将 M 上的每一点唯一地映射到 S^2 上.根据这一原理,可以构造一个分片线性映射

$$\Gamma = \{\Gamma^j, j \in \{0, \dots, |F| - 1\}\}$$

使得

$$\Gamma^j(\nu_i) = p_i, \nu_i \in V, p_i \in S^2, i \in \{0, \dots, |V| - 1\}$$

其中, Γ^j 表示第 j 个三角形上的线性映射, $|V|$ 和 $|F|$ 分别表示网格的顶点数和面数.可以证明,若 Γ 是映上的,则 Γ 就是 M 与 S^2 之间的同胚映射, Γ^{-1} 称为网格 M 的参数化.参数化过程就是求解映射 Γ 的过程.

为简单起见,假设以下所论述的网格都是亏格为零的三角形网格,而且对物体、对象和网格不加区别.

1 相关工作

由于在许多计算机图形学应用中网格参数化的重要性,经许多研究工作者的多年努力现已积累了大量的研究成果,现对与本文相关的部分文献做简单的回顾.

1992年, Kent 等人率先提出通过将某些类型的网格映射到球面的方法求解网格之间的顶点对应关系,从而实现三维形体之间的形状过渡^[1].虽然该文中没有明确提出网格参数化的概念,也没能提出一种能够处理任意类型网格的通用算法,但它为其后许多关于网格球面参数化的工作奠定了基础. Shapiro^[2]等人则首先对网格进行逐点删除简化,直到最终得到一个凸四面体为止,再将被删除的顶点按与删除时相反的顺序逐次添加回到网格上,同时保证在其中的每一步所得到的中间模型都是一个凸多面体^[2].如有必要可以很容易地将这样的凸多面体通过 Kent 提出的方法^[1]投影到球面上.受 Kent

等人工作的启发,并结合平面图的平面嵌入方法, Alexa 提出了一种基于松弛迭代算法的能够处理任意网格的网格球面投影算法^[3],并以此为基础实现了相似形体之间的形状过渡. Alexa 方法的最大缺点就是其迭代算法的效率很低.最近,浙江大学周昆等人提出了一种称为累进球面参数化的全局参数化方法^[4],该方法联合应用 Lee 所采用的局部参数化方法^[5]和累进网格(PM)技术^[6]可以实现任意亏格为零的三角形网格的全局球面参数化,同时还给出了许多漂亮的应用结果^[4].

上述网格参数化方法的一个共同特点是他们都采用球面作为参数域.而另一类广泛应用的参数域是平面区域.利用调和映射的平面嵌入性质, Eck 等人应用调和映射将具有单边界的网格映射到一个凸平面多边形区域上,从而实现了网格的平面参数化^[7],同时,在此基础上,对网格进行重采样使其满足多分辨率分析的需要. Lee 则将参数化引入到累进网格构造中,提出了所谓的多分辨率适应性网格参数化方法(MAP)^[5],实现了网格在其简化得到的基网格上的全局参数化.受调和映射平面嵌入性质和基于质心映射(Barycentric Map)平面图的平面嵌入方法的启发, Floater 指出,不但调和映射具有平面嵌入性质,任何凸组合映射(Convex Combination Map)都具有这一性质,并将其用于网格的平面参数化中,而质心映射只是凸组合映射的一个特例^[8~10].调和映射和质心映射方法都要求先找到一个映射将网格的边界固定到一个平面的凸区域边界上, Hormann 所提出的方法^[11]则放宽了这一要求,使得边界顶点和内部顶点可以采用统一的方法参数化, Labsik 采用文献^[7]中的方法来实现网格的参数化^[12].

本文采用改进了累进球面参数化方法^[4],进一步提高了这一算法的效率和稳定性.

2 两个重要的算子

Laplace 算子和松弛算子,都可以用来解决球面投影过程中发生的面折叠问题.

2.1 Laplace 算子

关于 Laplace 算子的细节可以参阅文献^[13].对定义于网格 M 顶点上的离散信号,作用其上的无约束 Laplace 算子 $L(x)$ 定义为

$$L(x_i) = \Delta x_i = \sum_{j \in i^*} w_{i,j}(x_j - x_i)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}, x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$$

这里 i^* 为与顶点 i 相邻的顶点集, $w_{i,j}$ 为凸组合系数, 即 $w_{i,j} > 0$, 且 $\sum_{j \in i^*} w_{i,j} = 1$, 简单地取 $w_{i,j} = 1/d$, d 为顶点 i 的度数. 如果将顶点 i 的坐标值 v_i 看成是定义于顶点 i 上的一种矢值信号, 则将算子 $L(x)$ 作用于网格 M 的一次迭代可以表示为

$$V' = V + \Delta V = \{v'_i | v'_i = v_i + \Delta v_i, \Delta v_i = L(v_i)\}$$

2.2 松弛算子

对定义于网格 M 顶点上的离散信号 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$, 松弛迭代算子 $R(x)$ 定义为

$$R(x_i) = \frac{1}{d} \sum_{j \in i^*} x_j, i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

事实上, 这里的松弛算子就是前面提到的质心映射, 即如果将松弛迭代算子作用于顶点坐标值, 则取顶点坐标值为其相邻顶点坐标值的算术平均.

3 球面参数化

3.1 直接球面映射法

从 Laplace 算子和松弛算子的表达式可以看出, 将这两个算子作用于网格上的顶点坐标, 直观上就相当于将顶点的位置移向其相邻顶点的质心, 只不过移动的程度不同而已. 如此一来, 松弛算子可以看成是 Laplace 算子的一种特例, 只是它的收敛速度比 Laplace 算子快一些, 由于效率在算法实现中是一个需要考虑的重要因素, 因此本文选择了松

算子.

Laplace 算子是一种低通滤波器, 用它对网格 M 进行有限次迭代, 可以想像, M 将会越来越光滑. 然而由于 Laplace 算子只是对低通滤波器的一种近似, 这种迭代会导致网格的陷塌, 其极限是一个点, 即网格的质心. 为了防止网格陷塌, 可以将网格通过中心投影到一个单位球面上, 这里要求投影中心位于网格的内部. 这种简单的投影肯定会导致大量的折叠面存在, 而在球面上面发生折叠的地方, 正是定义于网格顶点上、几何信号频率非常高的地方, 因此可以用一个低通滤波器来将这些高频部分过滤掉, 只留下低频部分, 从而防止折叠现象. 将网格投影到单位球面上之后, 可以用松弛算子对其施行迭代, 每迭代一次, 都将受影响的顶点进行归一化处理, 使其始终位于单位球面上, 这样就能够保证最终得到的结果是一个没有折叠面的球面网格, 从而找到了从网格到球面的一个一一映射, 即实现了网格的球面参数化. Alexa 正是采用这种方法来实现网格的球面参数化的^[3], 只不过在他的算法中需要首先在单位球面上设定几个锚点 (Anchor), 但锚点设置不当, 会导致迭代失败, 即网格塌陷, 发生网格塌陷以后就需重新确定锚点再进行迭代. 即便他们采用了一些简单的启发规则来选取锚点, 但锚点的选择还是存在很大的不确定性, 从而直接导致算法的低效率. 本文试验表明, 在不设置任何锚点的情况下进行迭代, 反而不会导致网格的陷塌, 而且对绝大多数模型都是有效的. 图 1 是对一个猫模型进行松弛迭代的结果.



图 1 对猫模型进行松弛迭代的结果

3.2 累进球面参数化

采用松弛迭代方法虽然能够有效消除面折叠情况, 但是这样的迭代过程是非常耗时的, 特别是当模型非常复杂和不规则的时候, 这种方法效率特别低.

基于累进网格的球面参数化方法通常分为网格简化和顶点放置两个步骤.

3.2.1 网格简化和局部参数化

累进网格表示法是一种网格多分辨率表示方法^[6], 构造一个网格的多分辨率表示是通过执行一系列的边折叠操作来实现的. 边折叠操作 $col(e = (v_1, v_2))$ 就是将边 e 的两个顶点 v_1 和 v_2 合并成为一个顶点 v , 每执行一次边折叠操作可以减少一个顶点和两个面, 在 v_1 和 v_2 同时为边界顶点的情况下只减少一个顶点和一个面 (图 2 所示).

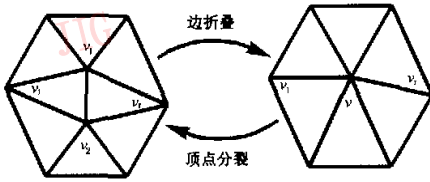


图 2 边折叠和顶点分裂操作

对一个网格 $M = M_n$ 连续执行 n 次边折叠操作可以得到一个简单基网格 M_0

$$M_n \xrightarrow{ecol_{n-1}} M_{n-1} \xrightarrow{\dots} M_1 \xrightarrow{ecol_0} M_0$$

顶点分裂操作 $vsplit(v)$ 是与边折叠互逆的一种操作,操作 $vsplit(v)$ 将顶点 v 分裂为顶点 v_1 和 v_2 . 设顶点分裂序列 $\{vsplit_0, vsplit_1, \dots, vsplit_{n-1}\}$ 是与边折叠序列 $\{ecol_0, ecol_1, \dots, ecol_{n-1}\}$ 对应的逆操作,则从基网格 M_0 开始,依次执行这一序列就可以恢复出原始网格 $M = M_n$.

$$M_0 \xrightarrow{vsplit_0} M_1 \xrightarrow{vsplit_1} M_{n-1} \xrightarrow{vsplit_{n-1}} M_n$$

与文献[6]中不同的是,这里不仅需要记录用于顶点分裂的必要信息,同时还记录了被删除顶点的局部参数化信息,该信息用于在累进恢复时,确定所添加顶点的位置. 因此,在进行网格简化的时候主要完成两项工作,即确定边折叠的顺序和被删除顶点的局部参数化.

本文采用 Garland 提出的基于二次误差的边折叠方法^[14]. 对于给定的边 $e = (v_1, v_2)$,其二次误差是指从执行顶点合并所得到的新顶点 v 到合并前与边 e 相邻的所有三角形所在平面距离平方之和 $D(v)$

$$D(v) = D([v_x, v_y, v_z, 1]^T) = \sum_{p \in Star(e)} (p^T v)^2$$

其中, $v = [v_x, v_y, v_z, 1]^T$, $p = [a, b, c, d]^T$ 表示 $Star(e)$ 中三角形所在平面的方程 $ax + by + cz + d = 0$, 且 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 满足. 确定合并后顶点位置的过程就是求解使 $D(v)$ 取最小值时 v 的过程. 在进行边折叠的时候,总是取当前具有最小二次误差的边进行折叠,同时更新受边折叠影响的边的二次误差,重复执行这一过程直到得到目标简化模型.

在计算被删除顶点 v_1 和 v_2 相对于新顶点的邻域 $Star(v)$ 的局部参数化信息时,周昆首先用 Lee 所提出的方法^[5]构造一个保角映射^[4],将顶点 v 的星形邻域 $Star(v)$ 映射到一个平面凸区域 U 上,然后采用 Eck 的方法^[7]构造调和映射,并利用其平面嵌入性质将顶点 v_1 和 v_2 分别嵌入到 U 中,最后求

取 v_1 和 v_2 局部参数化信息,即其相对于所在 U 中三角形的质心坐标,供后面累进恢复的时候确定添加回来的顶点在已恢复部分凸多面体上的位置(图 3).

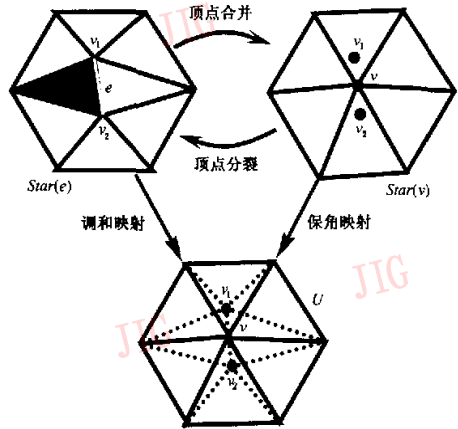


图 3 基于调和映射和保角映射的局部参数化

3.2.2 全局球面参数化

在网格简化的过程中实现了被删除顶点的局部参数化后,再用这些局部参数化信息实现网格的全局球面参数化. 通过网格简化得到了一个简单的网格 M_0 ,称为基网格,为满足球面中心投影的需要,通常要求基网格是一个凸多面体或者星形物体^[1]. 采用中心投影将基网格投影到单位球面上,得到球面初始球面网格 S_0 , 然后从 S_0 开始,依次执行顶点分裂序列中记录的顶点分裂操作,并利用网格简化时记录的拓扑信息和局部参数化信息,将被删除的顶点按与删除时相反的顺序逐次放置到单位球面上,每放置完一个顶点,都要对其进行归一化,使其位于单位球面之上. 算法最后得到一个位于单位球面上同构于原始网格 M_n 的参数网格 S_n , 记该同构映射为 $\Pi: M_n \rightarrow S_n$, 则由 Π 可以导出一个同胚映射 $\Gamma: M_n \rightarrow S_n$. 将 M_n 中任意点映射到 S_n 中的点,使得映射 Γ 的逆映射 Γ^{-1} 就是所求的参数化映射. Γ 可以通过如下方式得到:若映射 Π 将 M_n 中的三角形 $\triangle ABC$ 映射到参数空间 U 中的三角形 $\triangle \Pi(A)\Pi(B)\Pi(C)$, 则 $\triangle ABC$ 上的任意一点 P , 设 P 相对于 $\triangle ABC$ 的质心坐标为 (α, β, γ) , 映射 Γ 可以定义为 $\Gamma(P) = \alpha\Pi(A) + \beta\Pi(B) + \gamma\Pi(C)$ ($0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$) 可知

$$\Gamma^{-1}(\Gamma(P)) = \alpha\Pi^{-1}(\Pi(A)) + \beta\Pi^{-1}(\Pi(B)) + \gamma\Pi^{-1}(\Pi(C))$$

由定义可知, Γ^{-1} 是一个分片线性的同胚映射, 即 Γ^{-1} 就是 $M = M_0$ 的全局参数化.

3.3 改进的累进球面参数化

与周昆的方法^[4]不同, 本文使用了与其不同的局部参数化方法. 周昆所提出的方法^[4]虽然能够保证参数网格具有局部的最小变形, 但是由于它需要先对新顶点 v 的一环邻居 $N(v)$ 按顺时针或者逆时针排序, 这在顶点 v 位于一个以上的边界上时, 不易处理; 在顶点 v_1 和 v_2 嵌入到 U 中时, 需要求解一个 $|N(v)| + 3$ 阶线性方程组, 这需要大量的计算; 再就是在网格简化的过程中, 很难保证顶点 v 的邻域是与圆盘同胚的, 即可能会出现简化得到的中间网格不再是流形的复杂情况(图 4(b)所示).

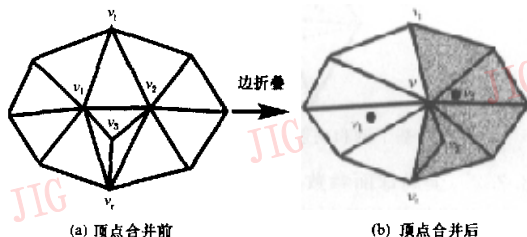


图 4

针对这些不足, 这里对其进行了一些改进. 如图 4(b)所示, 在计算顶点 v_1 和 v_2 的局部参数化信息时, 可简单地将 v_1 和 v_2 向 v 的星形邻域进行投影. 记施行边折叠操作得到新顶点 v 以后, 与 v 相邻的三角形的集合为 Δv , Δv 中原来与顶点 v_1 和 v_2 相邻的三角形的集合分别为 Δv_1 和 Δv_2 (图 4(b)中白色部分三角形和灰色部分三角形). 投影公式为

$$p_1 = P_{v_1} = \{P | P \in \Delta v_1, \rho(v_1, P) = \rho(v_1, \Delta v_1)\}$$

$$p_2 = P_{v_2} = \{P | P \in \Delta v_2, \rho(v_2, P) = \rho(v_2, \Delta v_2)\}$$

这里, P 为三角形内的点, P_v 表示对顶点 v 进行投影得到的投影点; ρ 取豪斯道夫距离, 其几何意义就是, 取顶点 v_1 在 Δv_1 上的投影为 Δv_1 上距 v_1 最近的点, 同理, 取顶点 v_2 在 Δv_2 上的投影为 Δv_2 上距 v_2 最近的点. 当 Δv_1 或 Δv_2 为空集的时候, 则取 Δv 替代, 算法保证了 Δv 是不为空的.

既然已经将 v_1 和 v_2 投影到了 Δv 上, 接下来就可以分别求 p_1 和 p_2 相对于各自所在三角形的质心坐标, 即 v_1 和 v_2 的局部参数化坐标. 有了局部化参数信息以后, 就可以采用文献^[4]中的方法来实现网格 M 的全局参数化.

(1) 本文所采用的方法对基网格的形状并没有特殊的要求, 因为即使网格不是一个凸多面体或者星形物体, 对其投影到单位球面上后出现的面折叠情况也可以通过 Laplace 算子迭代消除. 将基网格投影到单位球面上所得到的球面网格的折叠面消除以后, 就可以用顶点分裂操作将被删除的顶点添加回来, 只不过新顶点的坐标应由局部参数化得到的质心坐标来求得, 并且对求得的坐标要进行归一化处理, 使其位于归一球面上.

(2) 如图 4(b)所示, 当对顶点 v 和 v_i 决定的边再进行边折叠操作时, 点 v_3 将变成孤立点, 对这样的点, 算法没有进行参数化处理, 在累进恢复的时候容易造成边折叠现象. 因此在必要的时候可以对中间模型进行 Laplace 磨光处理.

(3) 对于经过以上两步处理后得到的最终球面网格, 仍不能保证没有折叠面存在, 因此最后仍需进行几次 Laplace 磨光处理, 只不过迭代的次数比文献^[3]中的大大减少了.

(4) 在每次 Laplace 磨光处理之后, 本文都对磨光后的网格重新进行中心投影, 使其始终位于单位球面之上.

4 结果及讨论

如图 5 所示, 给出了几个标准模型的球面参数化结果. 前面提及, 进行网格参数化的目的在于进一步的应用, 比如数字几何处理. 事实上, 顶点的几何坐标、纹理坐标以及颜色等信息都可以看成是定义在网格表面上的各种信号在该点处的值, 而网格表面上其他点处的各种信号值则可以由顶点处相应信号的值经双线性插值得到. 既然归结为信号, 就有信号处理问题, 比如恢复、增强、滤波以及压缩等. 对于



图 5 几个标准模型的球面参数化结果

定义在不规则空间曲面上的信号处理是缺乏有力的数学工具的,而人们对定义于平面和球面上的信号却有很好的研究.因此,将网格参数化到球面或者平面就可以满足数字几何处理的需要,这也正是本文的后续工作的重点之一.

致 谢 本文的工作在很大程度上受周昆已经完成的工作的启发,而且在作者完成本文的过程中一直得到他及其课题组成员无私帮助,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- Kent J R, Carlson W E, Parent R E. Shape transformation for polyhedral objects [J]. Computer Graphics (In: Proceedings of SIGGRAPH'92), 1992, 26(2): 47~54.
- Shapiro A, Ayellet T. Polyhedron realization for shape transformation [J]. The Visual Computer, 1998, 14(8-9): 429~444.
- Alexa M. Merging polyhedral shapes with scattered features [J]. The Visual Computer, 2000, 16(1): 26~37.
- 周昆. 数字几何处理: 理论与应用 [D]. 杭州: 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 2002.
- Lee A W F, Sweldens W, Schröder P *et al.* MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'98 [C], Florida, USA, 1998: 95~104.
- Hoppe H. Progressive Mesh [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'96 [C], New Orleans, USA, 1996: 99~108.
- Eck M, DeRose T, Duchamp T *et al.* Multiresolution analysis of arbitrary meshes [A]. In Proceedings of SIGGRAPH'95 [C], LOS Angeles, CA, USA, 1995: 173~182.
- Floater M S. Parameterization and smooth interpolation in geometric modeling [J]. ACM Transactions Computer Graphics, 1997, 8(2): 121~144.
- Floater M S, Reimers M. Meshless parameterization and surface reconstruction [J]. Computer Aided Geometric Design, 2001, 18(2): 77~92.
- Floater M S. Parameterization and smooth approximation of surface triangulations [J]. Computer Aided Geometric Design, 1997, 14(3): 231~250.
- Hormann K, Greiner G. MIPS: An efficient global parameterization method [A]. In: Laurent P-J, Sablonnière P, and Schumaker L L, Eds., Curve and Surface Design: Saint-Malo, 1999(2000) [M], Vanderbilt, USA: Vanderbilt University Press, 2000: 219~226.
- Labsik U, Hormann K, Greiner G. Using most isometric parameterizations for remeshing polygonal surfaces [A]. In: Proceedings of Geometric modeling and processing [C], Hong Kong, 2000: 220~228.
- Taubin G. A signal processing approach to fair surface design [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'95 [C], LOS Angeles, CA, USA, 1995: 351~357.
- Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics [C]. In: Proceedings of SIGGRAPH'96 [C], New Orleans USA, 1996: 209~216.



谭家万 1974 生, 大连海事大学航海动态仿真与控制交通部重点实验室 99 级博士研究生. 主要研究领域为计算机图形学, 虚拟现实和分布交互仿真.



金一丞 1944 年生, 1967 年毕业于浙江大学电机系, 现为大连海事大学航海动态仿真与控制实验室教授, 博士生导师. 主要研究方向为交通信息工程与控制、航海仿真、虚拟现实、计算机图形学及实时视景生成.



石教英 1937 年生, 毕业于前苏联列宁格勒大学, 现为浙江大学计算机系教授, 博士生导师, 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室学术委员会主任. 主要研究方向为分布图形计算、科学计算可视化、虚拟现实及多媒体计算理论等.