

二阶多面体网格中关键特征控制的表面重建技术

刘鹤丹 王成恩

(东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819)

(东北大学辽宁省复杂装备多学科设计优化技术重点实验室 沈阳 110819)

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要 针对基于二阶多节点多面体网格的表面重建过程中存在的准确拓扑及绘制、传输代价等问题,提出了一种基于关键特征控制的表面重建技术。研究并分析了二阶多节点多面体单元等参插值函数的性质特征,在网格单元棱边插值计算曲面轮廓点,在网格表面及体内提取曲面的几何特征关键点;根据3类插值关键点间的逻辑关系制定了令拓扑准确唯一的面片三角化规则及修复策略,设计了基于关键点的三角面片压缩索引结构。实验结果表明,该方法可准确计算并描述基于二阶多节点多面体网格单元的曲面几何拓扑结构,反映网格单元内部面片的真实凹凸性质,克服了拓扑二义性,具备对不同精度要求的适应性,并有效降低了绘制与传输代价。

关键词 可视化,二阶多节点多面体,表面重建,准确拓扑,绘制与传输代价

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.008

Surface Reconstruction Skill Based on Key Characteristics Control in Second-order Polyhedral Meshes

LIU He-dan WANG Cheng-en

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(Liaoning Province Key Laboratory of Multidisciplinary Optimal Design for Complex Equipment,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract In order to solve the problem of accurate topologies and the cost of drawing and transmission during the surface reconstruction process in second-order multi-node polyhedral, the surface reconstruction skill based on key characteristics control was proposed. The method analyzes the characteristics of second-order multi-node polyhedral parameter interpolation functions, calculates accurate contour points in edge, extracts surface and mesh key points which can perform the geometric characteristics of surface in second-order multi-node polyhedral. Based on the logical relationship among the three types of interpolation critical point, it develops the surface triangulation rules which have accurate and unique topologies, and the split-style compress index structure of triangle to triangulation, image optimization and drawing. The experiments show that the method can describe the surface accurately, define an unique geometry topology within second-order tetrahedral mesh grid, has the adaptability for different accuracy requirements, and can reduce costs of computation, drawing and transmission dramatically.

Keywords Visualization, Second-order multi-node polyhedral, Surface reconstruction, Accurate topology, Drawing and transmission cost

1 引言

科学计算可视化的核心是三维数据场的可视化^[1],基于等值面的表面重建是三维标量场数据的基本表达形式。已有许多学者对绘制方法进行了探索与研究。W. E. 于1987年提出了基于8节点六面体体元的典型面绘制方法 Marching Cubes 法^[1](以下简称 MC 法);Nielsen 利用渐近线解决了 MC 算法中的二义性问题^[2];B. K. Natarajan 发现了体二义性并提出了最初的解决办法^[3];Cignoni 基于面鞍点和体鞍点对 MC 算法构造了扩展查找表(ELUT)^[4],同时提出渐进网格法

逼近精度;Lopes 引入了肩点和变形点^[5]来更准确地描述网格内部等值面的走势。近年来,面向各类网格生成的等值面抽取及表面重建的研究^[6]仍是可视化领域中的重要课题。

目前,有限元法分析三维问题的基本网格是四面体及六面体网格单元。然而,基本四面体及六面体的计算精度及应用有限,与之相比,Zienkiewicz 和 Phillips^[7,8]提出的等参超单元网格生成法生成的多节点多面体等参单元因计算精度高,可以适应复杂几何形状等而应用最为广泛。高阶多节点多面体中,插值函数更复杂,生成的插值点及三角面片数量更加庞大,图像的计算、绘制与传输效率需要依赖结果的压缩处理操

到稿日期:2013-12-26 返修日期:2014-03-15 本文受国家高技术研究发展计划(863)(2009A04Z104)资助。

刘鹤丹(1983-),女,博士生,主要研究方向为科学计算可视化、数据集成,E-mail:liuhedan@hotmail.com;王成恩(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为复杂产品数字化设计、科学计算可视化等。

作^[9,10]。本文针对二阶 10 节点四面体及二阶 20 节点六面体等参插值函数特征进行分析,提出了基于关键特征控制(Key Characteristics Control,KCC)的面向该两种网格单元的表面重建技术。

2 二阶多节点多面体单元内部标量场

如图 1 所示,在参数空间所在局部坐标系中建立基本多面体单元。基本 10 节点四面体单元以原点为一个顶点,以该顶点为公共顶点且沿 3 个坐标轴方向的棱边长为 1,10 个节点分别为 4 个网格顶点及 6 个棱边中点;基本 20 节点六面体单元以原点为几何中心,边长为 2,20 个节点分别为 8 个网格顶点及 12 个棱边中点。

n 节点曲边多面体与图 1 局部坐标系中所对应的基本单元相互映射的位移函数公式如式(1)所示。

$$x = \sum_{i=1}^n N_i x_i, y = \sum_{i=1}^n N_i y_i, z = \sum_{i=1}^n N_i z_i, T = \sum_{i=1}^n N_i T_i \quad (1)$$

其中,10 节点四面体单元内部标量场插值函数形函数为:

$$\begin{aligned} \text{角节点: } N_i &= (2L_i - 1)L_i, i=1, 2, 3, 4 \\ \text{棱中点: } N_5 &= 4L_1 L_2, N_6 = 4L_2 L_3, N_7 = 4L_1 L_3, \\ N_8 &= 4L_1 L_4, N_9 = 4L_2 L_4, N_{10} = 4L_3 L_4 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,点 P 的体积坐标 (L_1, L_2, L_3, L_4) 与直角坐标 (ξ_p, η_p, ζ_p) 的关系为:

$$\begin{cases} L_1 = 1 - \xi_p - \eta_p - \zeta_p \\ L_2 = \xi_p \\ L_3 = \eta_p \\ L_4 = \zeta_p \end{cases}$$

20 节点六面体内部标量场插值函数形函数为:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{8}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0)(\xi_0 + \eta_0 + \zeta_0 - 2) \\ \xi_i &= 0, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = \pm 1; N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0) \\ \xi_i &= \pm 1, \eta_i = 0, \zeta_i = \pm 1; N_i = \frac{1}{4}(1 - \eta^2)(1 + \xi_0)(1 + \zeta_0) \\ \xi_i &= \pm 1, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = 0; N_i = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + \xi_0)(1 + \eta_0) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\xi_0 = \xi_i \xi, \eta_0 = \eta_i \eta, \zeta_0 = \zeta_i \zeta, i=1, 2, \dots, 20$ 。

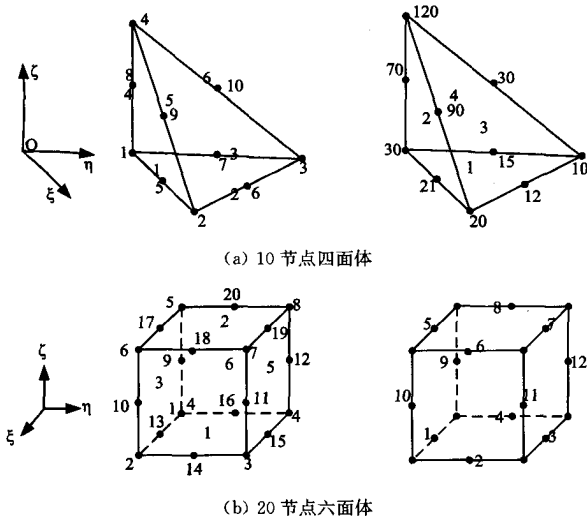


图 1 多节点多面体单元结构示意图

3 保持几何拓扑特征的表面重建技术

3.1 方法概述

为保持表面几何拓扑特征,重建过程分为“插值点抽取与匹配”、“基本面片三角化及压缩存储”以及“光滑优化”3 个模块。算法步骤如下:

(1)将全局坐标系下的曲边多节点多面体映射到局部坐标系中的直边基本网格单元,在基本单元中执行以下步骤;

(2)简化棱边及表面插值函数,抽取单元各棱边插值点,根据棱边插值点计算面关键点,生成面片闭合轮廓,以插值函数结合轮廓点来计算该单元的体关键点,并与闭合轮廓结果匹配;

(3)以体关键点为公共中心点,顺次提取相邻两个匹配轮廓点将面片三角化,以面片为单位将其存储于相应压缩索引结构;

(4)若需要更高精度图像,则按照修复优化策略,利用相应压缩索引结构对现有三角面片进行剖分;

(5)将生成的三角面片反映射回全局坐标系下的曲边多节点多面体网格单元。

3.2 插值点抽取及匹配

本文抽取的数据点根据其所在单元上的位置分为 3 类:棱边插值点、表面关键点和体关键点。3 类点均位于重建表面上,均满足 20 节点六面体等参插值函数,棱边数据点与表面关键点为面片轮廓构成基本点,表面关键点和体关键点可分别在网格表面和体内控制面片的凹凸形状。

在网格单元棱边上利用等参插值函数计算出的插值点即为棱边插值点,棱边插值函数 F_{edge} 可简化为仅与其所在棱边的 3 个已知节点相关的一元二次函数形式:

$$F_{edge} = \sum_{i=1}^2 N_{v_i} \cdot F_{v_i} + N_m \cdot F_m \quad (4)$$

其中, v_i 为该棱边两端点 ID, m 为棱边中点 ID, F 为节点数值。

为解决同一棱边出现两个插值点有效解且二者应为同一面片的相邻轮廓点等相对复杂的问题,本文引入面肩点^[4,5]作为表面关键点,即网格表面与面片的交线上的几何特征点。

如图 2 所示,选择 M, N 为基础点计算出该条函数曲线上距离 \overline{MN} 最远的一点 P (面肩点),将其作为表面插值关键点,则折线段 $\overline{MP}, \overline{PN}$ 相比直线段 \overline{MN} 可以更精确地描述面片;若选择 M, M' 为基础点,则该计算无解,由此避免二义性进而得出网格单元表面面片轮廓的精确拓扑。

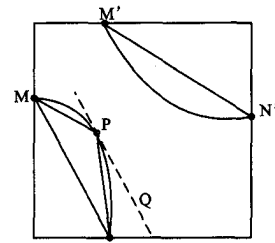


图 2 面关键点

二阶多节点多面体各表面插值函数 F_{face} 可简化为以下二元二次函数形式:

$$F_{face} = \sum_{i=1}^l (N_{v_i} \cdot F_{v_i} + N_{m_i} \cdot F_{m_i}) \quad (5)$$

其中, l 为表面棱边数目, v_i 为棱边端点 ID , m_i 为棱边中点 ID 。

根据表面插值函数, 以当前重建表面阈值作为限制条件, 将点 P 到直线 MN 的距离作为最大极值目标函数, 可利用拉格朗日乘子法计算点 P 。若有解, 则将计算出的最大解 P 作为表面关键点, 令基础点 M, N 分别与之连接, 以“棱插值点 1-表面关键点-棱插值点 2”即“ $MP-N$ ”连接关系结构输出; 若网格内部无解, 则排除点 M, N 的相邻轮廓点关系。在网格单元各表面将棱边插值点顺次排列为一个环状结构; 在各环状结构内部遍历所有的两点组合, 计算面片轮廓片段; 至各表面计算完毕, 将轮廓片段以相同的插值点 ID 首尾顺次连接, 从而生成了完整封闭的面片轮廓曲线。

为表现重建面片的内部几何信息, 将表面关键点的涵义扩展到三维空间, 引入可表现网格内部面片凹凸性的体关键点。本文对于单元体内是否存在回转(loop back)面片的两种情况分别抽取变形点和近似中心点作为体关键点。

二阶 n 节点多面体网格单元内部插值函数为:

$$F = \sum_{i=1}^n N_i F_i \quad (6)$$

若单元体内面片出现回转, 即同一面片从单元同一表面穿入并穿出, 则计算并抽取以某坐标轴正交面为切面的面片切点(即变形点)作为体内关键点。网格区域内变形点 T 满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \xi} |_{T=0} \\ \frac{\partial F}{\partial \eta} |_{T=0} \\ F_T - C = 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \xi} |_{T=0} \\ \frac{\partial F}{\partial \zeta} |_{T=0} \\ F_T - C = 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \xi} |_{T=0} \\ \frac{\partial F}{\partial \zeta} |_{T=0} \\ F_T - C = 0 \end{cases} \quad (7)$$

T 的解集即为该网格中重建面片的变形点集合, 需将其与该网格中各组面片轮廓选择性匹配。如图 3 所示, 根据同一轮廓中的棱边插值点及面关键点计算该轮廓的坐标平均点 G 。若该网格内仅有一组轮廓, 在变形点集合中选取距离该轮廓平均坐标点最远的点作为该组轮廓相匹配的体关键点。若该网格内有多组轮廓, 则如图 3 所示, 先计算坐标平均点距离各变形点最近的轮廓, 将所有变形点分配给所对应的(距离最近)轮廓组; 而后, 各组轮廓分别从其关联变形点中选取与其坐标平均点距离最远的点作为体关键点与之匹配。若单元体内存在无回转面片, 则该单元中不存在变形点或某组轮廓在上述匹配过程中不能成功(如图 3 中轮廓 G_3)。此种情况下, 受文献[4, 11]中对于双肩点近似求解的启发, 以无回转面片轮廓的坐标平均点 G_3 为基础点, 沿 G_3 点处函数梯度(或相反)方向计算该轮廓所在面片的近似中心点 B 。

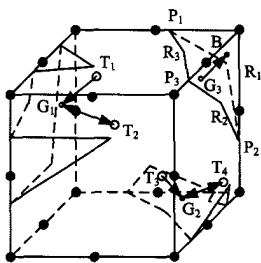
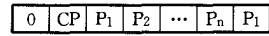


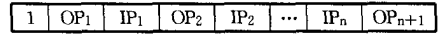
图 3 变形点与面片轮廓匹配

3.3 基本面片三角化及压缩存储

3 类插值点以其所属位置进行划分, 该特点与插值函数特征决定了插值点计算过程中的“棱-面-体”的逻辑关系, 同时也决定了“体关键点-表面关键点-棱插值点”的三角形几何拓扑关系。面片的体关键点位于面片中心区域, 与其匹配轮廓中任意两个相邻轮廓点搭配即可将该面片三角化。以此三角化模块为基础, 设计了如图 4 所示的三角面片压缩索引结构来存储初始面片及其优化结果面片。



(a) 具有唯一公共点的三角面片(边缘点数目= n)



(b) 带状三角面片(三角带外围点数目= $n+1$, 内围点数目= n)

图 4 三角面片压缩索引结构

三角面片压缩索引结构头元素为标识位, “0”表示该面片以体关键点为公共中心点, “1”表示该面片为连续三角带。图 4(a)所示为具有唯一公共中心点的面片, 第二位用来存储公共中心点(体关键点), 而后将该闭合轮廓中的轮廓点顺次存储为后续元素, 则公共点与后续结构中任意两个相邻元素即构成一个三角面片。该压缩索引结构的构成部分恰好与面片重建过程中的计算模块结果一一对应, 同时可作为优化剖分时的分裂基本结构。图 4(b)所示为三角带的存储结构, 标识位后任意相邻的 3 个元素即构成一个三角面片。

3.4 光顺优化

实际工程应用中, 存在图像整体或局部光顺或精度变化的需求, 这可在基本三角面片基础上对数据点进行删除和增加来实现。提高精度时, 本文的面片剖分原则为添加尽可能少的插值点, 尽量避免优化过程中产生过大的计算、绘制及传输代价, 因此以图 4 所示的三角面片压缩索引结构为辅助, 采用如图 5 所示方式进行优化剖分, 具体步骤如下:

- (1) 类似计算面关键点方法, 计算网格单元表面上相邻两个插值点间的插值点;
- (2) 计算各三角面片位于网格单元内部的边的中点及其梯度, 沿梯度方向将其移动到面片上(阈值范围内的中点不用移动);
- (3) 重新生成三角面片;
- (4) 若不满足精度要求, 则减小阈值, 转到步骤(1); 若满足精度要求, 则执行步骤(5);
- (5) 以相应结构存储三角面片, 结束。

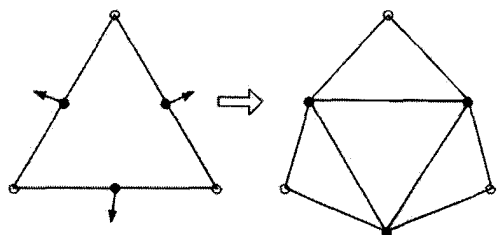


图 5 修复策略的三角面片剖分示意图

图 6 说明了针对该算法设计的面片优化计算及存储过程。图 6(a)为初始面片, 存储结构为:

0	B	P ₁	R ₁	P ₂	R ₂	P ₃	R ₃	P ₄	R ₄	P ₁
---	---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

将其按修复策略进行一次优化后的结果如图 6(b)所示, 存储结构为:

0	B	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₁
---	---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

及

1	P ₁	Q ₁	Q ₉	Q ₂	R ₁
---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

等 8 个类似结构。

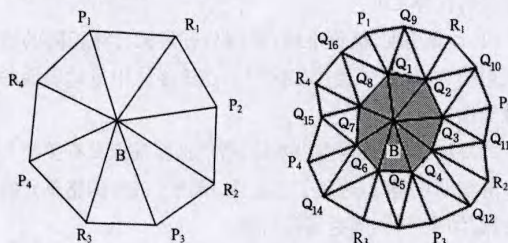
对图 6(b)所示面片中一三角带结构进行二次深度优化, 结果如图 6(c)所示, 其压缩索引结构为:

1	P ₁	Q ₂₅	Q ₁₉	Q ₂₆	Q ₅	Q ₂₇	Q ₅₀	Q ₂₈	R ₁
---	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------

及

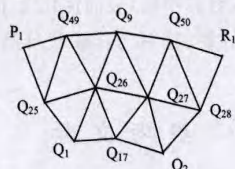
1	Q ₂₅	Q ₁	Q ₂₆	Q ₁₇	Q ₂₇	Q ₂	Q ₂₈
---	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------

本光滑优化策略为迭代过程, 基础点与插值点为“W”形状分布规律, 这保证了几何拓扑关联及逻辑关系, 因此将压缩存储过程直接植入优化过程, 仅对两类初始结构以一定的简单规律拆分并插入优化点即可, 两类压缩索引结构足以表示任意层次的深度优化结果。修复及存储索引两个过程相得益彰, 有效便捷地实现了多精度的适应需求。提出的压缩索引结构的一个目的在于降低优化插值点的计算代价, 若无压缩索引结构, 则各三角面片均计算 3 次优化插值点; 若使用压缩索引结构, 则各三角面片均计算两次优化插值点, 计算代价降低为无索引结构的 2/3。



(a) 三角化结果—未修复

(b) 优化结果—修复后



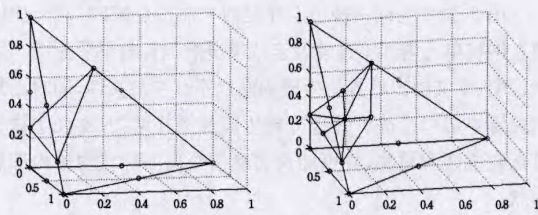
(c) 二次深度优化

图 6 重建面片优化前后对比

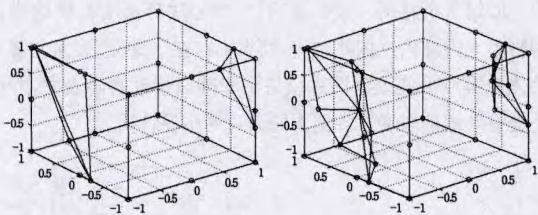
4 实验结果及分析

本节将对本文提出的表面重建方法的准确性及完备性进行验证; 而后将未压缩与使用压缩结构存储的三角面片结果文件的存储代价进行比较。所有程序均在 Intel(R) Xeon(R) CPU E5205 1.86GHz、1.87GHz, 8GB 内存的计算机上采用 VC++ 编程实现。

图 7 分别为仅在棱边计算抽取数据及添加了表面关键点和体关键点后的重建面片效果。通过对比可知, 添加关键插值点后, 可以正确描述面片在网格单元表面及内部的真实凹凸走势。

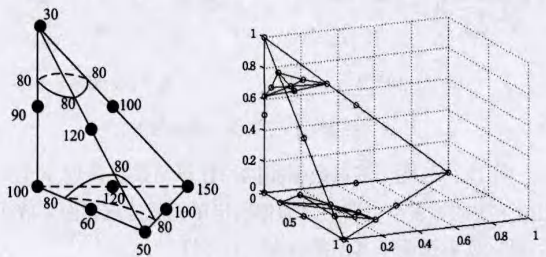


(a) 10 节点四面体

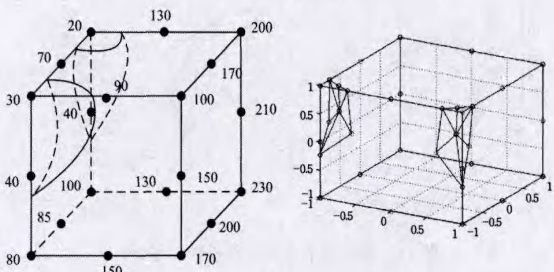


(b) 20 节点六面体

图 7 面及体关键点添加前后效果对比图

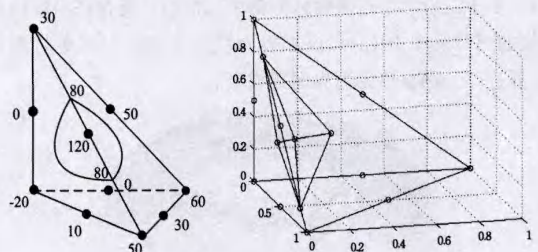


(a) 10 节点四面体

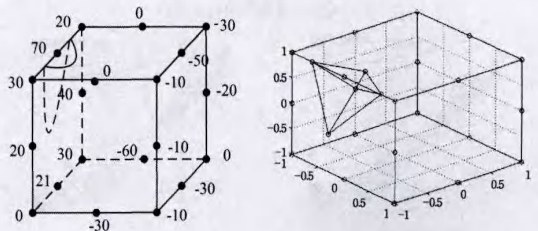


(b) 20 节点六面体

图 8 同一棱边两个不连续插值点解效果



(a) 10 节点四面体



(b) 20 节点六面体

图 9 同一棱边两个相连插值点解效果图

图8、图9为同一棱边上存在两个插值点解时,两个插值点在网格单元内部不连续及连续情况的面片效果示意图。结果说明,本文提出的方法生成的面片不存在二义性,同时添加的关键点可以准确有效地分辨出面片拓扑结构,实现了体关键点智能匹配轮廓,并更加真实地描绘出面片在网格内部形状。

图10为可能存在的二义性拓扑单元利用本文方法得到的实验结果示意图。结果证明,本文方法可真实有效地描述网格单元内部面片拓扑结构,结果不存在二义性,表面关键点及体关键点可使重建面片结果更加准确接近真实表面,并可简捷有效地抽取表达各类不同面片的拓扑特征。

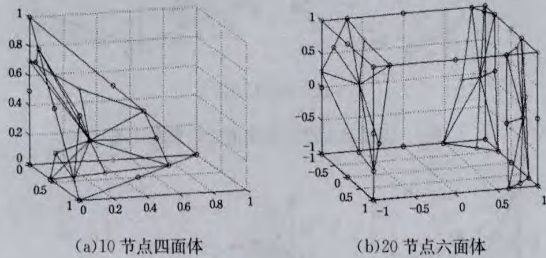


图10 克服拓扑二义性实例效果图

图11为与图7测试数据相同的计算结果反射至全局坐标系中的原多节点曲边多面体网格单元后的重建面片效果示意图,实验证明了其结果的真实有效性。

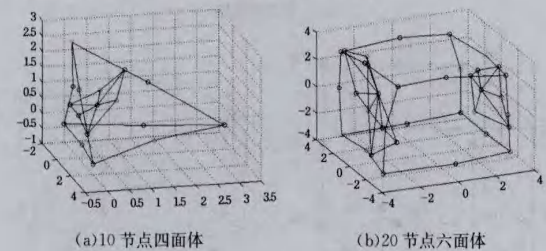


图11 曲边多节点多面体反射结果

图12为仅在网格单元棱边提取插值点后以最小距离进行三角化后的表面重建效果及本文算法的表面重建效果对比图。由于二阶多节点多面体网格单元棱边可能存在多解情况(例如图9及图10(a)),添加表面及体关键点可避免将面片边界近似为网格单元边界而造成空洞。

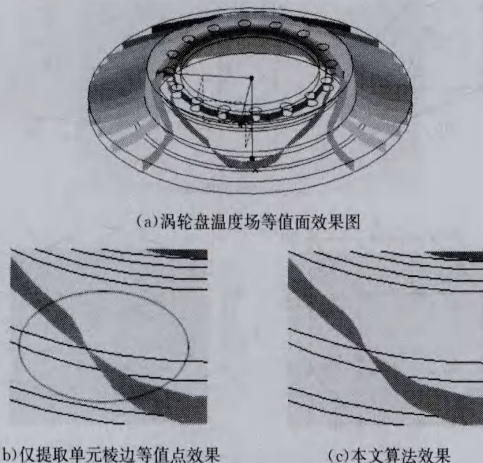
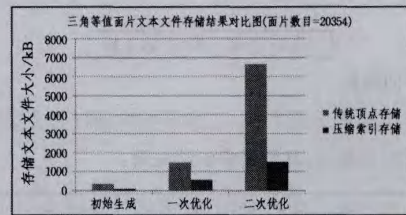
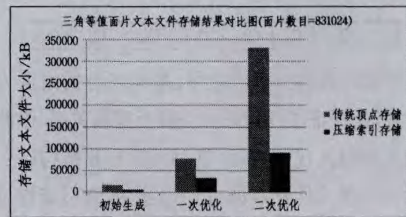


图12 工程应用实例效果对比图

面片存储代价对比实验分别在结果面片为20354和831024的两个数据集上进行测试。如图13所示,本文算法初始计算生成及优化后的三角面片结果,利用本文提出的相应压缩结构存储后,所得结果相比常规顶点形式存储的代价大大降低。



(a) 面片数目为20354



(b) 面片数目为831024

图13 面片不同存储方式存储代价对比示意图

结束语 本文研究了基于二阶多节点多面体网格的表面重建问题,提出了关键特征控制的表面重建方法,设计了评价实验,实验结果证明了该方法的正确性和有效性。研究表明,该方法的优势在于:

(1) 计算简便,插值准确,采用与有限元计算相同的插值与映射模式,确保了曲边二阶多节点多面体中重建表面的拓扑准确性;

(2) 以准确的数据点为基础,智能选择提取具有关键几何特征的辅助数据点,避免了二义性,解决了二阶网格单元的多解问题,结果准确,逼近实际结构;

(3) 巧妙利用3类数据点间的几何关联及逻辑关系,将面片三角化过程嵌入计算模块,表面优化及压缩索引策略简捷有效,可以更低计算、绘制与传输代价满足更高的精度需求。

参考文献

- [1] 唐泽圣,孙延奎,邓俊辉. 科学计算可视化理论与应用研究进展[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41(405):199-202
- [2] Lorensen W E, Cline H E. Marching Cube: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[J]. Computer Graphics, 1987,21(4):163-169
- [3] Natarajan B K. On Generating Topologically Consistent Isosurfaces from Uniform Samples[J]. The Visual Computer, 1994, 11(1):52-62
- [4] Cignoni P, Ganovelli F, Montani C, et al. Reconstruction of topologically correct and adaptive trilinear surface[J]. Computers and Graphics, 2000,24(3):399-418
- [5] Lopes A, Brodlie K. Improving the robustness and accuracy of the marching cubes algorithm for isosurfacing[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003,9(1):16-29
- [6] 关振群,宋超,顾元宪,等. 有限元网格生成方法研究的新进展

- [J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2003, 15(1): 1-14
- [7] Zienkiewicz O C, Phillips D V. An Automatic Mesh Generation Scheme for Plane and Curved Surfaces by Isoparametric Coordinates [J]. *International Journal of Computational Physical*, 1979, 33(2): 405-410
- [8] Martins P A F, Barata M J, Marques, Models3-a Three-Dimensional Mesh Generation [J]. *Computer & Structures*, 1992, 42(4): 511-529
- [9] 于荣欢, 邓宝松, 吴玲达, 等. 三维标量场并行等值面提取与绘制技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(2): 244-251
- [10] 齐从谦, 陈亚洲, 甘屹, 等. 反求工程中复杂曲面数字化重构关键技术的研究 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(4): 131-135
- [11] 夏仁波, 刘伟军, 王越超. 保证拓扑正确的高精度等值面提取技术 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(6): 133-140

(上接第 11 页)

- [13] Chaurasiya V K, Kumar S R. Traffic Based Clustering in Wireless Sensor Network [C] // Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, WCSN, IEEE, 2008: 83-88
- [14] Kim J-H, Hussain C S. PRODUCE; A Probability-Driven Unequal Clustering Mechanism for Wireless Sensor Networks [C] // 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications -Workshops, WAINA. IEEE, 2008: 928-933
- [15] Saeidmanesh M, Hajimohammadi M. Energy and Distance Based Clustering: An Energy Efficient Clustering Method for Wireless Sensor Networks [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, 55: 555-559
- [16] Ishmanov F, Kim S W. Distributed Clustering Algorithm with Load Balancing in Wireless Sensor Network [C] // World Congress on Computer Science and Information Engineering. IEEE, 2009: 19-23
- [17] Wang Chong, Liu Jia-kang. An Improved LEACH Protocol for Application Specific Wireless Sensor Networks [C] // WiCOM 09 Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communication Networking and Mobile Computing. IEEE, 2009: 1-5
- [18] Kumar D. Energy Efficient Heterogeneous Clustered Scheme for Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Communications*, 2009, 32(4): 662-667
- [19] Elbhiri B, Saadane R. Stochastic Distributed Energy-Efficient Clustering (SDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks [J]. *ICGST International Journal on Computer Network and Internet Research*
- [20] Brahim E, Rachid S. Stochastic and Balanced Distributed Energy-Efficient Clustering (SBDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks [J]. *Signal Processing and communications group UPC*, 2009
- [21] Kumar D, Trilok C. Distributed Cluster Head Election (DCHE) Scheme for Improving Lifetime of Heterogeneous Sensor Networks [J]. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2010, 13(3): 337-348
- [22] Saini P, Sharma A K. Energy Efficient Scheme for Clustering Protocol Prolonging the Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2010, 6(2): 30-36
- [23] Elbhiri B, Saadane R. Developed Distributed Energy-Efficient Clustering (DDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks [C] // 5th International Symposium on I/V Communications and Mobile Network (ISVC). IEEE, 2010: 1-4
- [24] Lee K, Lee H. A Density and Distance based Cluster Head Selection Algorithm in Sensor Networks [C] // The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2010: 162-165
- [25] Kim K T, Yoo H K. EECS; An Energy Efficient Cluster Scheme In Wireless Sensor Networks [C] // IEEE International Conference on Computer and Information Technology. 2010: 535-540
- [26] Nazir B, Hasbullah H. Mobile Nodes based Clustering Protocol for Lifetime Optimization in Wireless Sensor Network [C] // International Conference on Intelligent and Information Technology. 2010: 615-620
- [27] Said B A, Abdellah E. Improved and Balanced LEACH for Heterogeneous Wireless Sensor Networks [J]. *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSSE)*, 2010, 2(8): 2633-2640
- [28] Zheng Qing-chao. An Energy Efficient Clustering Scheme with Self-Organized ID Assignment for Wireless Sensor Networks [C] // 2010 IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). IEEE, 2010: 635-639
- [29] Mehrani M. FEED; Fault tolerant, energy efficient, distributed Clustering for WSN [C] // Advanced Communication Technology (ICACT). 2010: 580-585
- [30] Choi Jin-chul, Lee C. Energy consumption and lifetime analysis in clustered multi-hop wireless sensor networks using the probabilistic cluster-head selection method [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, 156: 1-13
- [31] Rashed M G, Kabir M H. WEP; an Energy Efficient Protocol for Cluster Based Heterogeneous Wireless Sensor Network [J]. *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPSS)*, 2011, 2(2): 54-60
- [32] Kumar A, Chand N. Location Based Clustering in Wireless Sensor Network [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, 5(12): 1313-1320
- [33] Siva Ranjani S, Radha Krishnan S. Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks [C] // Recent Advances in Computing and Software Systems (RACSS). IEEE, 2012: 174-179
- [34] Gupta S K, Jain N, Sinha P. A Density Control Energy Balanced Clustering Technique for Randomly Deployed Wireless Sensor Network [C] // 2012 Ninth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN). IEEE, 2012: 1-5
- [35] Gupta S K, Jain N, Sinha P. Node Degree Based Clustering for WSN [J]. *International Journal of Computer Applications (IJCA)*, 2012, 40(16): 49-55
- [36] Zhang Yan, Yang L T, Chen Ji-ming. RFID and Sensor Networks [M]. Auerbach publication, 2010