

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.046

三角网格模型变形设计*

孙殿柱 田中朝 李延瑞 李心成

(山东理工大学机械工程学院, 淄博 255091)

【摘要】 提出了一种三角网格模型变形算法,采用最小二乘法求解三角网格模型变形设计的参考曲面,将网格顶点向参考曲面投影,建立网格顶点与投影点间的映射关系,通过调整参考曲面控制顶点,根据投影点位移量调整网格顶点坐标,采用三角 Bézier 曲面理论进行网格模型光顺处理,实例证明该方法可准确控制模型形状,有效提高三角网格模型的光顺性及变形设计效率。

关键词: 三角网格模型 参考曲面 三角 Bézier 曲面 光顺处理 变形设计

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0223-04

Innovative Deformation Design of Triangular Mesh Model

Sun Dianzhu Tian Zhongchao Li Yanrui Li Xincheng

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract

A design algorithm of a triangular mesh model was proposed, that included four steps: first, the reference surface of the triangular mesh model was obtained with least square method; second, the projection point of vertex on mesh was calculated and the mapping relationship of mesh vertex and projection point was built; third, the coordinates of mesh vertexes were changed according to the displacement of projection points when adjusting the control points of reference surface; and fourth, the fairing of mesh model was built with triangular Bézier surface design method, which proved that the deformation region of triangular mesh model was effectively controlled. The smoothness of mesh model and the efficiency of innovative deformation designing have been improved effectively.

Key words Triangular mesh model, Reference surface, Triangular Bézier surface, Fairing processing, Innovative deformation design

引言

目前针对三角网格模型的变形设计,主要是通过建立变形控制模型予以实现。文献[1]通过构造一个足够大的三参数 NURBS 自由体,将待变形网格模型嵌入到自由体中,调整自由体控制顶点实现网格模型的变形设计,该方法难以实现局部变形控制;文献[2]通过提取模型骨架,调整骨架端点实现模型局部变形,但无法实现模型表面细节特征编辑;文献[3]通过逼近编辑区域求解变形控制网格,可实现模型表面细节特征编辑,由于未对编辑后的三

角网格模型进行优化处理,模型光顺性较差;文献[4]采用逼近方式获取编辑区域控制网格,对细分之后的编辑区域进行变形设计,可实现网格模型的局部光顺变形,但变形过程需反复计算细分网格顶点坐标,变形运算量大、效率低。

针对上述问题,本文提出一种三角网格模型变形设计算法,通过求解变形设计区域的参考曲面并建立网格模型顶点与参考曲面上投影点之间的映射关系,调整参考曲面控制顶点并计算投影点位移,根据投影点位移调整网格顶点坐标,基于三角 Bézier 曲面理论对变形网格进行光顺处理。

收稿日期:2009-02-18 修回日期:2009-04-10

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z105)

作者简介:孙殿柱,教授,主要从事 CAD/CAM 一体化、逆向工程、先进制造技术研究,E-mail: dianzhus@sdut.edu.cn

1 网格顶点参数化及参考曲面求解

采用最小二乘法求解编辑区域网格顶点逼近平面,如图1所示,图中控制网格所表达的平面为编辑区域的逼近平面。

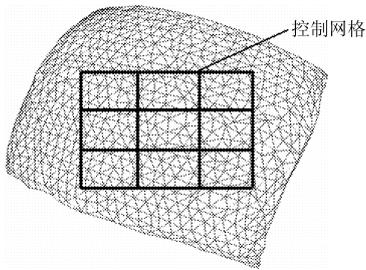


图1 编辑区域及逼近平面示意图

Fig.1 Editing region and the best fitting plane

设编辑区域顶点为 $\mathbf{p}_1(x_1, y_1, z_1)$, $\mathbf{p}_2(x_2, y_2, z_2)$, \dots , $\mathbf{p}_k(x_k, y_k, z_k)$, 所求逼近平面方程为: $ax + by + cz + d = 0$, 令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_k & y_k & z_k & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则平面拟合方程为

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用特征向量估计法求解方程(2),对矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 进行奇异值分解得

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4 \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (3)$$

其中 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 为正交矩阵, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的特征值,其中最小特征值对应的特征向量即为方程(2)的最小二乘解。

设求得的逼近平面方程 $ax + by + cz + d = 0$, 法向量为 $\mathbf{n} = [a, b, c]^T$, 任意网格顶点 \mathbf{p} 在该平面上的投影点 \mathbf{q} 为

$$\mathbf{q} = \mathbf{p} - \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} + d}{\|\mathbf{n}\|^2} \mathbf{n} \quad (4)$$

采用式(4)求解网格顶点在参考曲面上的投影点 $\mathbf{q}_1(x'_1, y'_1, z'_1)$, $\mathbf{q}_2(x'_2, y'_2, z'_2)$, \dots , $\mathbf{q}_k(x'_k, y'_k, z'_k)$ 。

以投影点集的重心 $\bar{\mathbf{q}}$ 为坐标原点,与距 $\bar{\mathbf{q}}$ 最近的投影点 \mathbf{q}_j 构成的向量为 u 轴、过 $\bar{\mathbf{q}}$ 且垂直于 u 轴和 \mathbf{n} 的向量为 v 轴建立局部坐标系,求解投影点在

局部坐标系下的坐标 (u_i, v_i) , 并计算投影点的轴向包围矩形面积^[5-6]。

通过旋转坐标系并求解投影点在新坐标系下的轴向包围矩形面积,图2所示为坐标系绕其坐标原点 O 旋转角度 θ 后的坐标系和投影点集的轴向包围矩形,其中黑圆点为投影点。

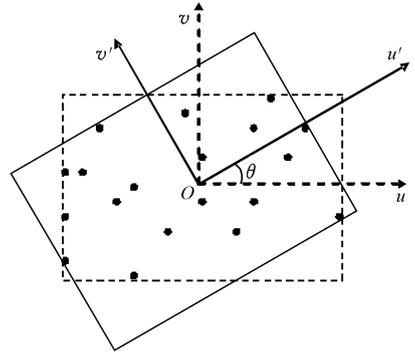


图2 坐标系及轴向包围矩形的旋转

Fig.2 Rotation of coordinate and axis bounding rectangle

局部坐标系绕其坐标原点按指定角度旋转一周,以轴向包围矩形面积最小时对应的局部坐标系为网格点的参数坐标系。由于坐标系旋转角度 θ 与旋转角度 $\theta + \pi/2$, $\theta + \pi$ 或 $\theta + 3\pi/2$ 时的轴向包围矩形面积相等,所以仅在 $(0, \pi/2)$ 范围内旋转局部坐标系,旋转后所获取的轴向包围矩形为投影点集的近似最小包围矩形。

设局部坐标系在逼近平面内绕其坐标原点旋转角度 ρ 时轴向包围矩形面积最小,采用式(5)求解投影点在新坐标系下的坐标 (u'_i, v'_i) ,将参数坐标限定在范围 $[0, 1]$ 内实现投影点的规范参数化。网格顶点的参数值与其对应的投影点具有相同参数值,于是可得三角网格模型顶点的参数值。

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\rho & \sin\rho & 0 \\ -\sin\rho & \cos\rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

预设参考曲面为 $n \times m$ 次的 Bézier 曲面,通过在局部坐标系内均匀采样获取参考曲面控制顶点 $\mathbf{P}_{0,0}, \mathbf{P}_{0,1}, \dots, \mathbf{P}_{0,n}, \mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{1,1}, \dots, \mathbf{P}_{1,n}, \dots, \mathbf{P}_{m,0}, \mathbf{P}_{m,1}, \dots, \mathbf{P}_{m,n}$, 则参考曲面方程为

$$S(u, v) = \sum_{r=0}^n \sum_{s=0}^m B_{r,n}(u) B_{s,m}(v) \mathbf{P}_{r,s} \quad (6)$$

其中 $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$, 基函数 $B_{r,n}(u)$ 和 $B_{s,m}(v)$ 为 Bernstein 多项式。

2 三角网格模型变形及优化

为准确记录调整过程中参考曲面上网格顶点的投影点位移,并建立三角网格模型顶点与投影点映射关系,引入数据结构 AdjustPt,其定义如下

```
typedef struct ADJUST_PT {
    int id; // 对应网格顶点的标识 id 信息
    double u, v; // 网格顶点的参数值
    double x, y, z; // 网格顶点的投影点坐标
} AdjustPt;
```

在网格变形过程中,及时更新 AdjustPt 对象坐标,并计算 AdjustPt 对象的位移,根据 AdjustPt 对象 id 信息按相同位移修改网格顶点坐标。

通过调整参考曲面的控制顶点实现三角网格模型的变形,更新控制顶点,遍历所有 AdjustPt 对象,采用式(6)求解参考曲面上 AdjustPt 对象对应点的新坐标,根据 AdjustPt 对象的位移调整相应网格顶点坐标,实现三角网格模型变形设计。

三角网格模型变形结束之后,采用文献[7]算法构建一阶几何连续的三角 Bézier 曲面,进行三角网格模型光滑处理,通过将三角 Bézier 曲面均匀离散获取光滑的三角网格模型。图 3 所示为杯子三角网格模型光滑优化前后的渲染效果。

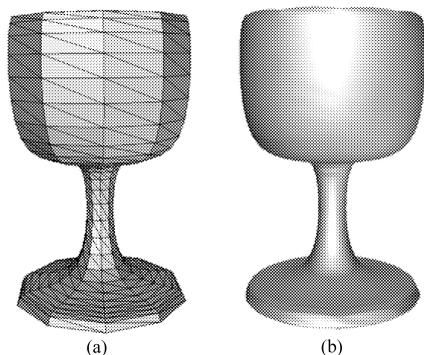


图 3 杯子模型及光滑后渲染效果

Fig.3 Cup model and its smooth model

(a) 优化前 (b) 优化后

3 应用实例

采用本文算法分别对苹果、牛和平面 3 种三角网格模型进行变形设计,具体过程和效果如下:

(1)对苹果三角网格模型进行变形设计,先对苹果模型进行整体变形设计,将底部区域设计出底盘,通过优化获取光滑的三角网格模型如图 4 所示。从图 4 可知,采用本文算法可分别对模型进行局部或整体变形设计,在保留模型原有特征的基础上设计模型的细节特征,且变形设计模型具有较好的光滑性。

(2)对牛三角网格模型进行变形创新设计,在

牛模型背部变形设计的驼峰效果如图 5 所示。

(3)对平面三角网格模型进行变形创新设计,在平面模型上设计的“TEST”字样的凸区域如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可知对变形设计区域进行变形设计后,模型的其他区域未受到变形设计的影响。

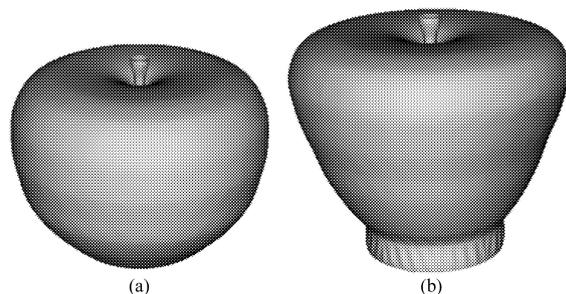


图 4 苹果模型变形效果

Fig.4 Deformation effect of an apple

(a) 变形前 (b) 变形后

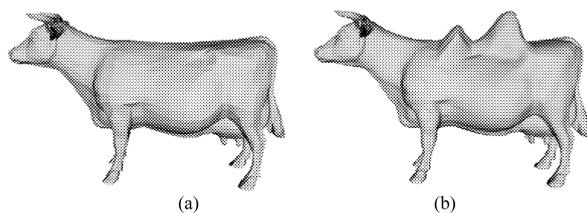


图 5 牛模型变形效果

Fig.5 Deformation effect of cow model

(a) 变形前 (b) 变形后

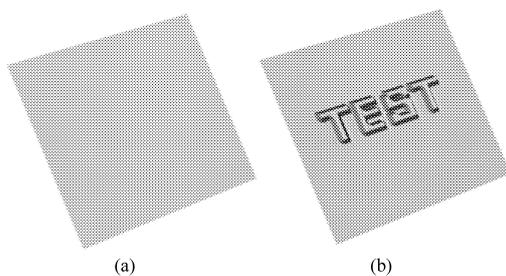


图 6 “TEST”凸区域变形效果

Fig.6 Deformation effect of “TEST” region

(a) 变形前 (b) 变形后

4 结论

(1)对网格模型进行局部变形设计,在保留模型原有特征的基础上实现了模型细节特征设计。

(2)将变形设计区域限制在较小范围内,有效降低了变形设计的计算量,提高了变形效率。

(3)基于三角 Bézier 曲面理论实现了网格模型的优化处理,有效提高了网格模型的光顺性。

参 考 文 献

1 王建哲,姜显明.基于 NURBS 的三维人体自由变形方法[J].计算机工程与应用,2002(17):95~97.

Wang Jianzhe, Jiang Yuming. Three-dimension human body free form deformation method based on NURBS [J]. Computer

- Engineering and Applications, 2002(17):95~97. (in Chinese)
- 2 段德全,李俊芬. 基于骨架的三维网格局部编辑[J]. 计算机工程与应用, 2006(33):88~90.
Duan Dequan, Li Junfen. Skeleton-based arithmetic of local edit for 3D meshes[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(33):88~90. (in Chinese)
 - 3 周廷方,冯结青,肖春霞,等. 基于层次 B 样条的网格模型变形技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(3): 443~450.
Zhou Tingfang, Feng Jieqing, Xiao Chunxia, et al. Mesh deformation with hierarchical B-splines[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(3):443~450. (in Chinese)
 - 4 秦绪佳,王青,华炜,等. 网格模型的局部编辑算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4):444~448.
Qin Xujia, Wang Qing, Hua Wei, et al. Local editing algorithm for mesh models[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(4):444~448. (in Chinese)
 - 5 孙殿柱,范述鑫,李延瑞,等. 三角网格细分曲面数控加工刀轨快速生成算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):218~221.
Sun Dianzhu, Fan Shuxin, Li Yanrui, et al. Algorithm of NC tool path generation for triangular meshing subdivision surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):218~221. (in Chinese)
 - 6 孙殿柱,朱昌志,李延瑞,等. 散乱点云局部型面参考数据的快速查询算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5):218~221.
Sun Dianzhu, Zhu Changzhi, Li Yanrui, et al. Algorithm of local model reference data querying for scattered points [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):218~221. (in Chinese)
 - 7 姜献峰,鲁聪达. 复杂曲面的 5 次三角域 Bezier 曲面拼接[J]. 浙江工业大学学报, 2000, 28(增刊):37~40.
Jiang Xianfeng, Lu Congda. Surface modeling with triangular surface patch of 5 degree [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2000, 28(Sup.):37~40. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 218 页)

- 3 Vijayaraghavan D, Keith T G. Development and evaluation of cavitation algorithm[J]. Tribology Transactions, 1989, 32(2): 225~233.
- 4 Bruno V, Maspeyrot P, Frene J. Cavitation in dynamically loaded journal bearings using mobility method[J]. Wear, 1996, 193(2):155~162.
- 5 Knight J D, Niewiarowski A J. Effects of two film rupture models on the thermal analysis of a journal bearing[J]. Tribology, 1990, 112(4):183~188.
- 6 Syverud T. Experimental investigation of the temperature fade in the cavitation zone of full journal bearings[J]. Tribology International, 2001, 34(12):859~870.
- 7 Ferron J, Frene J, Boncompain R. A study of the thermohydrodynamic performance of a plain journal bearing comparison between theory and experiments[J]. Lubrication Technology, 1983, 105(2):422~428.
- 8 Knight J D, Ghadimi P. Analysis and observation of cavities in a journal bearing considering flow continuity[J]. Tribology Transactions, 2001, 44(1):88~96.
- 9 Dowson D, Hudson J, Hunter B, et al. An experimental investigation of the thermal equilibrium of steadily loaded journal bearings[C]//Proc. Inst. Mech. Eng., Part 3B, 1966~1967:70~80.
- 10 El-Deihi M K I, Gethin D T. A thermohydrodynamic analysis of a twin axial groove bearing under different loading directions and comparison with experiment[J]. Tribology, 1992, 114(2):304~310.
- 11 Heshmat H. The mechanism of cavitation in hydrodynamic lubrication[J]. Tribology Transactions, 1991, 34(22):177~180.