

# 一种隐式曲面交互调整的新方法

周元峰<sup>1)</sup> 伯彭波<sup>3)</sup> 张彩明<sup>1),2)</sup> 高珊珊<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(山东大学计算机科学与技术学院 济南 250101)

<sup>2)</sup>(山东经济学院计算机科学与技术学院 济南 250014)

<sup>3)</sup>(香港大学计算机科学系 香港)

**摘 要** 提出了一种对隐式曲面形状进行交互调整的新方法,为隐式曲面的调整提供了两种交互工具,分别是对曲面上点的位置调整和法向调整.该方法以调整后的位置和法向为新曲面的插值条件建立目标函数,极小化该目标函数求解曲面参数的变化量,从而确定新的隐式曲面.文中采用拟牛顿法和序列二次规划法(SQP)求解该非线性优化问题.在调整过程中用粒子的方法对隐式曲面进行绘制,实现了对隐式曲面形状的实时交互调整.最后用实例说明了新方法的有效性.

**关键词** 隐式曲面;交互调整;优化;粒子系统;目标函数

中图法分类号 TP391 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.01206

## A New Interactive Method for Controlling Implicit Surfaces

ZHOU Yuan-Feng<sup>1)</sup> BO Peng-Bo<sup>3)</sup> ZHANG Cai-Ming<sup>1),2)</sup> GAO Shan-Shan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101)

<sup>2)</sup>(School of Computer Science and Technology, Shandong Economic University, Jinan 250014)

<sup>3)</sup>(Department of Computer Science, The University of Hong Kong, Hong Kong)

**Abstract** This paper proposes a new interactive method for controlling implicit surfaces. Two interactive controlling tools are introduced: position controlling handle and normal controlling handle. The new implicit surfaces are required to interpolate the adjusted position and normal vector at desired vertices on surfaces, which are appointed by user interaction. Quasi-Newton and SQP methods are applied to solve these optimization problems respectively. Particle system is used for real-time rendering of implicit surface. This provides a real-time and interactive method for controlling the shape of implicit surfaces. Experiences are included in the end to demonstrate the efficiency of the new method.

**Keywords** implicit surface; interactive control; optimization; particle system; objective function

## 1 引 言

随着计算机图形学、辅助几何设计、计算机建模

技术的发展,隐式曲面得到了更为广泛的关注和应  
用.在曲面建模中,隐式曲面的优势在于表达形式简  
单、用户可方便地判定空间点与隐式曲面的相对位  
置,而且其光滑性非常高.隐式曲面能够容易地表示

收稿日期:2007-10-09;最终修改稿收到日期:2009-01-22. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303102)和国家自然科学基金(60673003,60573180)资助. 周元峰,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、几何造型与处理. E-mail: yfzhou@mail.sdu.edu.cn. 伯彭波,男,1978年生,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、几何造型. 张彩明,男,1955年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学、计算机辅助几何设计和医学图像处理. 高珊珊,女,1980年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为计算机辅助几何设计、数字图像处理.

复杂拓扑的曲面,并且可以很容易地改变曲面拓扑结构.相对于参数曲面建模来说,隐式曲面的系数对于曲面形状的影响往往是不直观的,例如,对于代数曲面,给定代数曲面的系数之后很难预计它的形状.因此,隐式曲面模型的一个主要缺点是难以直观地控制和调整曲面的形状<sup>[1]</sup>.

近年来对于隐式曲面建模和控制的研究有很多<sup>[2-10]</sup>.目前使用的较多的隐式曲面类型主要包括代数曲面<sup>[4]</sup>和 blobby 曲面<sup>[5]</sup>.后者提供了一种方便的隐式曲面的交互设计方法.用户可通过交互修改各个 blobby 元素来局部修改隐式曲面,进而生成复杂形状的光滑曲面. blobby 曲面是一张由一些 blobby 基本元素所定义的标量场的等值面.但由于 blobby 元素的单一性,由 blobby 系统构造一张曲面需要大量基本元素,且用户对此难以有效控制,这给交互设计带来了极大的困难.

对于隐式曲面形状的交互调整一直是曲面建模绘制研究中一个比较难的问题. Witkin<sup>[5]</sup>提出了一种基于粒子化的方法对隐式曲面进行采样和控制.该方法约束一组粒子在曲面上,这些粒子自动对曲面进行采样.粒子之间的排斥力使粒子均匀地分布在曲面上.而且,该方法能够允许用户交互调整指定粒子的位置,从而改变曲面的形状.但是该方法所用的参数太多,难以控制,且文章中仅实现了对于曲面上点的位置的调整. Turk<sup>[10]</sup>提出了一种利用变分曲面进行插值建模的造型方法,该方法简单有效,得到的曲面插值为线性插值,构造出来的曲面形状较好,易于调整,但是该方法仅适用于变分曲面造型,对于一般的隐式曲面并不适用. Hart<sup>[6]</sup>改进了文献<sup>[5]</sup>中的方法,给出了一种自动确定参数的方法,能够对较为复杂的隐式曲面的形状进行调整.但这种调整方式也仅实现了对顶点位置的调整,交互调整方式过于单一.如何实时调整隐式曲面形状是隐式曲面应用中的难点问题.对于隐式曲面形状的调整问题实质上是如何基于约束条件确定新的隐式曲面表达式的系数.

基于上述问题,本文提出了一种隐式曲面形状交互调整的新方法.该方法实现了对隐式曲面上指定点进行位置调整和法向调整两种曲面形状调整方式.基于粒子系统对曲面进行实时绘制.根据用户希望的位置和法向建立目标函数和约束,利用优化方法极小化目标函数求解出调整后的隐式曲面系数.本文第2节介绍曲率自适应的隐式曲面粒子采样方

法;第3节给出交互调整方法的基本思想;第4节详细讨论目标函数建立和优化方法求解;第5节给出实验结果与数据说明;第6节是结论和进一步的工作.

## 2 基于粒子的隐式曲面显示

本文提出了交互调整曲面形状的方法,在显示的时候用了 Witkin<sup>[5]</sup>的粒子表示方法(如图1所示),这里先简短介绍 Witkin 的粒子方法.

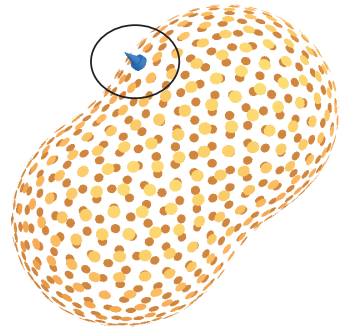


图1 blobby 表面上的点位置和法向控制手柄

Witkin 的隐式曲面建模方法是基于粒子采样系统来显示和控制一个隐式曲面.在隐式曲面  $f(\mathbf{x}, \mathbf{q})=0$  上约束一个圆点  $\mathbf{p}^i$  使得

$$f(\mathbf{p}^i, \mathbf{q})=0,$$

此处  $\mathbf{p}^i$  可以看作是浮动于隐式曲面上的一个粒子 (particle), 利用粒子之间的互斥力将粒子均匀地分布于曲面表面, 简单的互斥能够使得静态曲面得到很好的粒子分布, 但是需要一个较好的采样作为前提条件. Witkin 采样方法采用粒子动态分裂/消亡机制将粒子约束在曲面上, 初始给定一个随机粒子和一个比较大的互斥半径, 用迭代方法对粒子进行分裂或者消亡, 若粒子的互斥半径大于设定的半径阈值或者粒子能量大于设定的能量阈值, 则将该粒子一分为二, 并减少粒子之间的互斥半径; 反之, 若粒子的互斥半径过小, 则该粒子消亡. 迭代重复上述步骤, 直至所有粒子满足能量和互斥半径约束条件. 该方法速度很快, 收敛时可以得到隐式表面上的均匀的粒子采样. 本文采用该方法作为隐式曲面的实时绘制工具, 让用户在调整过程中可以实时的看到调整后的曲面形状.

## 3 算法基本思想

定义隐式曲面表达式为

$$f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{q})=0 \tag{1}$$

其中  $\boldsymbol{x}$  定义为表面上的点坐标,  $\boldsymbol{q}$  为隐式曲面表达式系数向量. 本文提出两种对于任意隐式曲面  $f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{q})=0$  的形状进行调整的工具, 分别是对表面上指定点的位置调整和法向的调整. 在调整过程中, 为了实时显示调整结果, 我们采用 Witkin 的粒子方法对隐式曲面进行实时绘制.

隐式曲面表达式(1)可以看作函数  $f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{q})$  的零值面. 当用户改变了隐式表面上的某一个顶点的位置或者法向之后, 曲面形状就会随之变化, 新的隐式曲面插值由新顶点的位置或法向来指定. 本文的方法以新顶点的位置或法向作为曲面形状改变的目标插值, 建立新的目标函数, 极小化目标函数求解新的隐式曲面系数变化量  $\Delta \boldsymbol{q}$ , 从而得到形状改变后的新的隐式曲面  $f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})$ . 这里, 该求解过程看作一个优化过程, 以插值条件建立目标函数, 进行优化. 第 3 节详细给出了插值目标函数的建立和求解方法.

4 隐式曲面交互调整新方法

首先介绍曲面交互调整的工具, 图 1 是采用粒子系统绘制的两个 blobby 球体组成的 blobby 曲面. 图中椭圆区域所标识的蓝色圆盘为表面上点的位置调整手柄, 蓝色圆锥为表面上点的法向调整手柄. 用户选中要调整的圆盘或圆锥, 调整到希望的位置或方向. 隐式曲面自动调整形状, 插值于用户的设定位置或法向. 用户可以在表面上的任何位置添加控制手柄.

4.1 基于顶点位置的调整

任意指定隐式表面上某一顶点  $\boldsymbol{x}_n$ , 通过交互方式将  $\boldsymbol{x}_n$  的位置移动至新位置  $\bar{\boldsymbol{x}}_n$ , 这时发生形变后的隐式曲面方程为

$$f(\bar{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})=0,$$

其中  $\Delta \boldsymbol{q}$  为隐式曲面方程系数的变化量.

利用隐式曲面是曲面表达式的零值面的性质, 我们定义目标函数如下:

$$F_{\text{position}}=f^2(\bar{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q}) \tag{2}$$

其中  $\Delta \boldsymbol{q}$  为方程未知量. 目标函数(2)的几何意义可以看作是调整后的顶点到新曲面的代数距离平方. 通过极小化  $F_{\text{position}}$  寻找通过新顶点  $\bar{\boldsymbol{x}}$  的零值面. 即求解

$$\min_{\Delta \boldsymbol{q}}(F_{\text{position}}) \tag{3}$$

4.2 基于顶点法向的调整

基于顶点位置的调整对于曲面形状设计来说比较直观, 但是调整方法过于单一. 本文还给出了基于曲面顶点法向的调整方法. 用户指定表面上的一点  $\boldsymbol{x}_n$ , 交互地将该点处法向的方向调整到一个新的方向.

(1) 无约束法向调整

假设对  $\boldsymbol{x}_n$  的法向调整之后的新法向为  $\bar{\boldsymbol{n}}$ , 以调整后的曲面在  $\boldsymbol{x}_n$  处的法向与用户给定法向同向为目标, 建立以下目标函数:

$$F_{\text{normal}}=\|\nabla f(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})\times\bar{\boldsymbol{n}}\|^2 \tag{4}$$

其中  $\nabla f(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})$  表示在  $\boldsymbol{x}_n$  处的梯度,  $\Delta \boldsymbol{q}$  为隐式曲面系数变化量.

极小化目标函数(4)得到未知量  $\Delta \boldsymbol{q}$  的值, 即求解:

$$\min_{\Delta \boldsymbol{q}}(F_{\text{normal}}) \tag{5}$$

(2) 带约束法向调整

一般来说, 改变了曲面一点的法向之后, 曲面发生形变, 这时曲面不会再插值于被修改法向的调整点. 为了约束新的曲面插值于调整点, 可以将顶点位置作为约束条件. 约束条件定义为

$$f(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})=0,$$

用带约束的极值求解方法极小化目标函数得到未知量  $\Delta \boldsymbol{q}$  的值, 即求解带约束的优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \boldsymbol{q}}(F_{\text{normal}}) \\ \text{constraint: } f(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{q}+\Delta \boldsymbol{q})=0 \end{aligned} \tag{6}$$

4.3 问题的求解

我们用优化方法求解(3)、(5)和(6) 3 个目标函数<sup>[11]</sup>, 确定隐式曲面系数的变化量  $\Delta \boldsymbol{q}$ . 对于非线性优化问题的求解, 本文采用拟牛顿法和序列二次规划方法(SQP).

(1) 牛顿法是求解无约束非线性优化问题的一种迭代方法. 对目标函数  $f(x)$  在初始值  $x_0$  点处进行二次 Taylor 展开, 求解该二次优化问题的解  $x_1$ , 作为下一次求解的初始值. 该方法在局部具有二次收敛速度. 拟牛顿法是牛顿法的改进, 利用目标函数一阶导数的信息对二阶导数进行逼近, 避免直接对目标函数求二次导, 减少了计算量.

(2) 序列二次规划算法(SQP)是求解带约束的非线性问题的一种迭代方法. 在每次迭代中求解一个二次规划子问题(QP 问题), 该子问题对目标函数进行二次逼近, 对约束条件进行线性逼近. 对于只有等式约束的非线性优化问题, 它采用拉格朗日乘子法把约束整合到目标函数里, 构造无约束的非线

性优化问题来求解。

拟牛顿法和 SQP 方法都是局部优化方法,均具有超线性收敛速度。在交互调整过程中,用户的调整是逐步的。每一步的调整,曲面的系数变化量  $\Delta q$  的初始值设定为 0,优化得到的解是目标函数局部极小值的解。在程序实现中本文使用 IMSL 数值库<sup>①</sup>,用于提高目标函数求解速度和稳定性,其拟牛顿法的实现是被广泛使用的 BFGS<sup>[11]</sup> 方法。

#### 4.4 算法描述

我们将基于顶点位置的调整和基于顶点法向的调整归结为两个交互算法如下。

##### 算法 1.

输入:隐式曲面  $f(\mathbf{x}, \mathbf{q})=0$ ;

1. 用户选定曲面上一点  $\mathbf{x}_n$ , 得到位置控制手柄;
2. 将指定的点  $\mathbf{x}_n$  拖拽到一个新的位置  $\bar{\mathbf{x}}_n$ ;
3. 根据新位置  $\bar{\mathbf{x}}_n$  建立目标函数(3);
4. 设定隐式曲面系数的变化量初始值为  $\Delta \mathbf{q}=0$ , 用拟牛顿法极小化目标函数, 求解  $\Delta \mathbf{q}$  的值;
5. 将  $\Delta \mathbf{q}$  代入隐式曲面表达式得到调整后的曲面, 继续调用步 2 直至得到用户满意的形状。

##### 算法 2.

输入:隐式曲面  $f(\mathbf{x}, \mathbf{q})=0$ ;

1. 用户选定曲面上一点  $\mathbf{x}_n$ , 得到其法向控制手柄;
2. 将指定的点  $\mathbf{x}_n$  的法向圆锥拖拽到一个新的位置  $\bar{\mathbf{n}}$ ;
3. 根据新位置  $\bar{\mathbf{n}}$  建立目标函数(5)或者带约束的优化目标函数(6);
4. 设定隐式曲面系数的变化量初始值为  $\Delta \mathbf{q}=0$ , 求解优化问题极小化目标函数。用拟牛顿法求解无约束下法向调整  $\Delta \mathbf{q}$  的值, 用 SQP 方法求解带约束的法向调整  $\Delta \mathbf{q}$  的值;
5. 将  $\Delta \mathbf{q}$  代入隐式曲面表达式得到调整后的曲面, 继续调用步 2, 直至得到用户满意的形状。

## 5 实验结果

本节给出了控制点的位置调整、无约束的法向调整和带约束的法向调整的曲面实例。本节的例子基于 blobby 曲面, 它是将 blobby 基本体素: blobby 圆柱、blobby 椭球和 blobby 球体加在一起构成复杂曲面的一种表示。本文的方法也适用于其它形式的隐式曲面。

Blobby 圆柱定义为围绕一条给定线段的区域, 其表达式为  $f(\mathbf{x})=-\exp(-|\mathbf{x}-\mathbf{c}|^2/s^2)$ , 其中  $\mathbf{c}$  表示点  $\mathbf{x}$  到直线段的最近点位置, 该直线段用两个点坐标表示。其系数向量为 7 个参数:  $\mathbf{q}=\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7\}$ 。直线段两个端点坐标分别为  $(q_1, q_2, q_3), (q_4, q_5, q_6)$ ,  $s$  为  $q_7$ 。

Blobby 椭球定义为对于一个中心点, 3 个坐标轴有不同的区域。其表达式为  $f(\mathbf{x})=-\exp(-|\mathbf{x}-\mathbf{c}|^2/s^2)$ , 其中  $\mathbf{c}$  为中心点位置,  $s$  为 3 个坐标轴上的不同轴长。其系数向量为 6 个参数:  $\mathbf{q}=\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$ 。中心点的坐标为  $(q_1, q_2, q_3)$ , 3 个轴长分别为  $q_4, q_5, q_6$ 。

Blobby 球体定义为围绕一个中心点的区域, 其表达式为  $f(\mathbf{x})=-\exp(-|\mathbf{x}-\mathbf{c}|^2/s^2)$ , 其中  $\mathbf{c}$  为中心点位置, 其系数向量为 4 个参数:  $\mathbf{q}=\{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ , 中心点的坐标为  $(q_1, q_2, q_3)$ ,  $s$  为  $q_4$ 。

图 2 给出了两个 blobby 曲面模型的粒子绘制, 图 3 是相应的 blobby 基本体素的网格绘制, 图 4 是 blobby 曲面的实体模型绘制。其中(a)为 peanut 曲面模型, 为两个 blobby 球体的和; (b)为 doll 曲面模型, 为两个 blobby 球体、一个椭球和 4 个圆柱体的和。

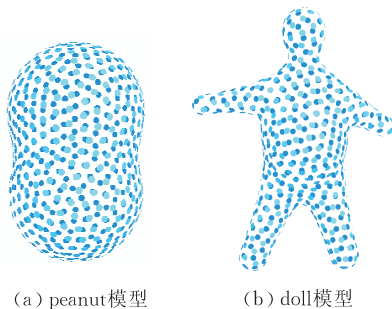


图 2 blobby 曲面模型粒子表示

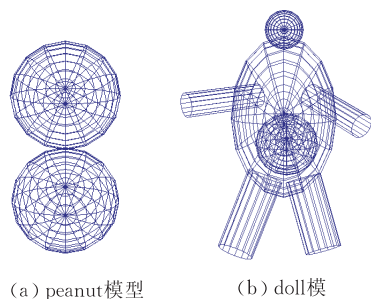


图 3 blobby 曲面基本体素的网格表示

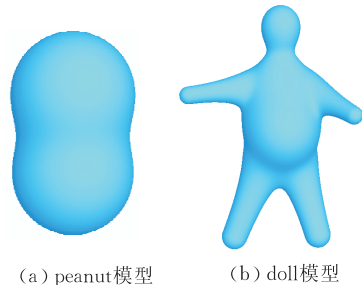


图 4 blobby 曲面实体模型表示

① IMSL C Library, User's Guide, Visual Numerics, Inc. <http://www.vni.com>

图 2 和图 3 中曲面的表达式及其系数向量分别表示如下.

Peanut 模型表达式表示如下.

$$f(x,y,z)=e^{-\frac{(x^2+(y-1)^2+z^2)}{0.01}}+e^{-\frac{(x^2+(y-1)^2+z^2)}{0.01}} \tag{7}$$

其中系数向量  $\mathbf{q}=(0.1,0,1,0,1,0,-1,0,1)$ .

Doll 模型中包含两个球体、一个椭球和 4 个圆柱,其表达式和系数向量分别为

Sphere 1:  $f(x,y,z)=e^{-\frac{(x^2+(y-3.70715)^2+(z-0.318082)^2)}{0.25}}$ ,  
 $\mathbf{q}_1=(0,3.70715,0.318082,0.500002)$ ;

Sphere 2:  $f(x,y,z)=e^{-\frac{((x-0.0649121)^2+(y-0.782588)^2+(z-0.898854)^2)}{0.807525^2}}$ ,  
 $\mathbf{q}_2=(0.0649121,0.782588,0.898854,0.807525)$ ;

Ellipsoid:  $f(x,y,z)=e^{-\frac{(x-0.012407)^2}{1.40912^2}+\frac{(y+1.3658)^2}{2.17936^2}+\frac{(z+0.237864)^2}{1.06615^2}}$ ,  
 $\mathbf{q}_3=(-0.012407,1.3658,0.237864,1.40912,2.17936,1.06615)$ ;

Cylinder 1:  
 $\mathbf{q}_4=(-1.35287,-2.31696,0.491862,-0.52341,-0.240533,0.181318,0.500096)$ ;

Cylinder 2:  
 $\mathbf{q}_5=(0.522111,-0.322919,0.0525218,1.07414,-2.22611,0.5863,0.500193)$ ;

Cylinder 3:  
 $\mathbf{q}_6=(0.721123,1.96025,-0.0568849,1.91803,$

$1.36972,1.60925,0.317488)$ ;  
Cylinder 4:  
 $\mathbf{q}_7=(-0.70197,1.96891,0.00536326,-2.46862,1.8427,1.20987,0.315755)$ .

图 5 给出了对于 peanut 模型曲面上一个顶点位置进行调整的实例,其中(a)是初始模型,蓝色的圆盘是控制点,用户拖动圆盘,曲面的形状随之变化.(b)、(c)是把控制点调整到不同位置的结果.(d),(e)和(f)是对应曲面的表面绘制.从图中可以看出,通过调整控制点的位置,可以直观的调整曲面的形状,使其经过用户指定的位置.(c)中两个 blobby 球体的分离显示了隐式曲面容易改变其拓扑形状的优点.图 6 给出了对于 peanut 模型曲面进行无约束法向调整的结果.该例子显示,通过控制点的法向调整,可以直观的改变曲面的形状,使其在控制点具有用户指定的法向方向.图 7 中给出了对于 doll 曲面模型的交互调整实例.其中(a)为原始曲面的粒子表示,(b)为对曲面上某一顶点进行位置调整的结果,(c)为对指定顶点的法向进行无约束调整的结果,(d)为对指定顶点的法向进行带约束调整的结果.在图 8 的例子中,用户在 doll 模型曲面上指定 5 个控制点,然后分别拖拽 5 个点将 doll 模型的四肢拉长,并将头部拖拽至脱离躯干.可以看出新的交互调整方法可以很容易改变原始曲面的拓扑结构.

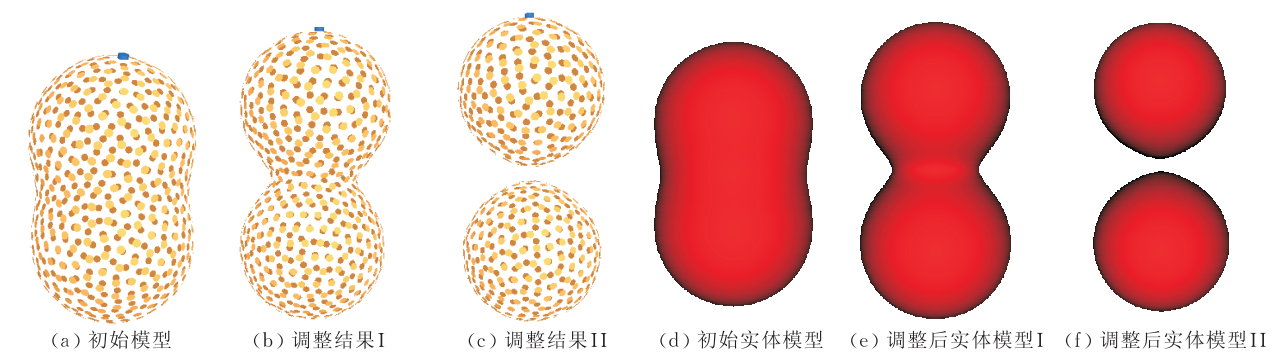


图 5 对 peanut 模型曲面顶点位置调整结果

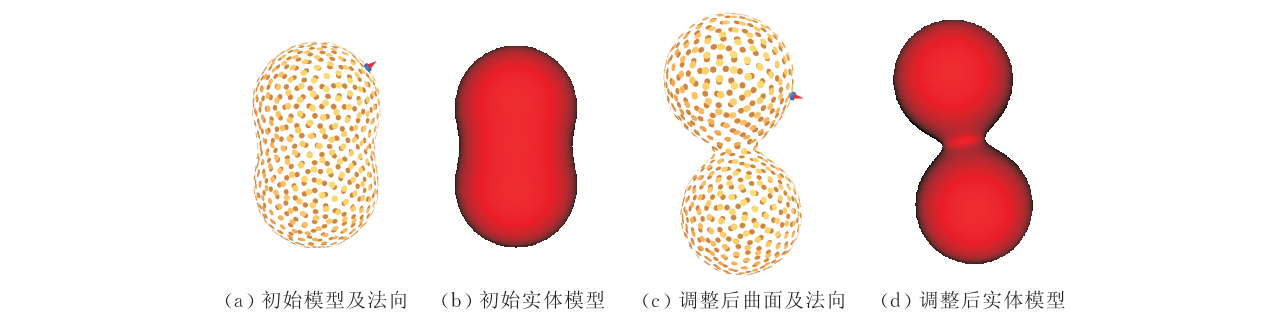


图 6 对 peanut 模型曲面无约束法向调整结果



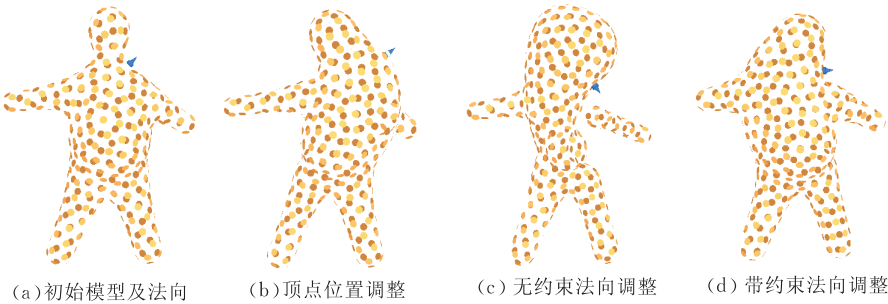


图 7 对 doll 曲面模型的顶点位置和法向调整

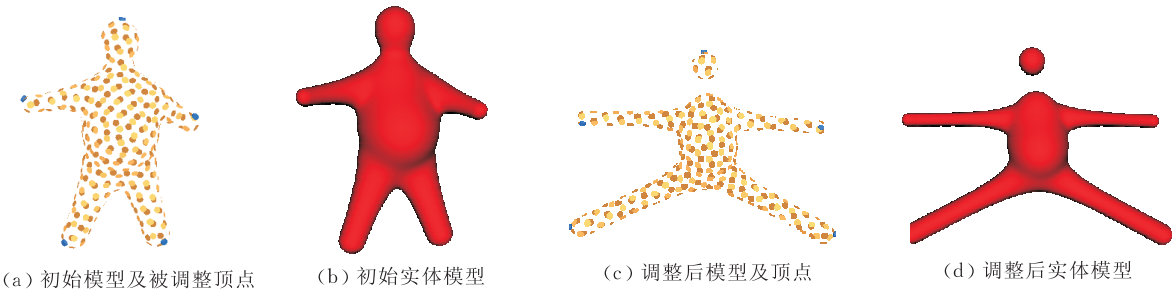


图 8 对 doll 模型曲面多个顶点位置的调整结果

本文方法的实现基于 Visual Studio 2005 编译环境,PC 配置为 2. 8GHz Pentium(R) 4 CPU 和 1GB 内存. 得益于采用的优化方法的快速收敛的性质以及粒子系统对隐式曲面实时绘制的能力,本文的方法达到了对隐式曲面实时交互调整. 对于本节

的例子,每次用户调整控制点的位置和法向所需的时间为 38~105ms,达到了实时调整的效果. 具体的时间数据和隐式曲面的参数变化量参见表 1,表 2 和表 3.

表 1 图 5 中调整结果的数据比较

比较结果	所选顶点位置	所花费时间/ms	曲面系数
初始模型(a)	(0.108433, 2.5004, 0.199201)	0	(0.1, 0, 1, 0, 1, 0, -1, 0, 1)
顶点调整后 I(b)	(0.749607, 2.92466, 1.22876)	62	(0.0948017, 0.033812, 2.13287, -0.0784693, 1.01861, -5.40194e-005, -1.00008, 9.42229e-005, 0.999906)
顶点调整后 II(c)	(0.833066, 3.44722, 1.15075)	92	(0.0929125, 0.0342821, 2.67257, -0.146967, 1.02698, -0.000188889, -1.00021, 0.000229093, 0.999771)

表 2 图 6 中调整结果的数据比较

比较结果	所选顶点法向	所花费时间/ms	曲面系数
初始模型(a)	(0.74065, 0.576329, -0.345373)	0	(0.1, 0, 1, 0, 1, 0, -1, 0, 1)
无约束法向调整后 I(c)	(-0.586766, -0.114165, -0.801668)	105	(0.0995085, -0.228863, 2.1971, -0.252157, 1.00581, -0.00459666, -1.00906, 0.000906126, 0.969618)

表 3 图 7 中调整结果的数据比较

比较结果	顶点位置	顶点法向	所花费时间/ms	曲面系数
初始模型(a)	(0.698444, 2.54288, 0.132953)	(0.582545, 0.812232, -0.0303365)	0	$q'_0$
顶点位置调整后(b)	(1.02606, -1.31355, -0.0610136)	(0.52527, -0.186199, -0.830314)	38	$q'_1$
无约束法向调整后(c)	(-0.50773, 4.15044, 0.659245)	(0.754179, -0.469746, -0.458861)	46	$q'_2$
带约束法向调整后(d)	(1.02606, -1.31355, -0.0610136)	(-0.394431, 0.599146, 0.696741)	62	$q'_3$

其中  $q'_0 \sim q'_3$  表示如下:

$q'_0 = (0.6, -1.35287, -2.31696, 0.491862,$   
 $-0.52341, -0.240533, 0.181318, 0.500096,$   
 $0.522111, -0.322919, 0.0525218, 1.07414,$

$-2.22611, 0.5863, 0.500193, -0.012407,$   
 $1.3658, 0.237864, 1.40912, 2.17936,$   
 $1.06615, 0.3.70715, 0.318082, 0.500002,$   
 $0.721123, 1.96025, -0.0568849, 1.91803,$

1.36972, 1.60925, 0.317488, -0.70197,  
1.96891, 0.00536326, -2.46862, 1.8427,  
1.20987, 0.315755, 0.0649121, 0.782588,  
0.898854, 0.807525);

$q_1' = (0.598836, -1.35288, -2.31697, 0.491849,$   
-0.523423, -0.240546, 0.181331, 0.500083,  
0.522098, -0.322932, 0.0525353, 1.07413,  
-2.22612, 0.586287, 0.50018, 0.50287,  
1.69244, 0.0296621, 1.55522, 2.26625,  
1.08416, 0.000834281, 3.70606, 0.317522,  
0.500055, 0.823084, 2.19911, -0.0507707,  
1.91804, 1.36974, 1.60923, 0.322333,  
-0.701983, 1.9689, 0.00537675, -2.46863,  
1.84269, 1.20986, 0.315742, 0.0657853,  
0.784754, 0.897992, 0.807604);

$q_2' = (0.597731, -1.35302, -2.31711, 0.491707,$   
-0.523565, -0.240688, 0.181473, 0.499941,  
0.521956, -0.323074, 0.0526765, 1.07399,  
-2.22626, 0.586145, 0.500038, 0.463631,  
2.24974, -0.000358701, 1.10848, 2.63614,  
1.15161, 0.0754685, 3.66058, 0.294111,  
0.698394, 0.792513, 2.16639, -0.0495025,  
1.91791, 1.36962, 1.60911, 0.220869,  
-0.702109, 1.96877, 0.00550192, -2.46876,  
1.84256, 1.20973, 0.315616, 0.0647639,  
0.783362, 0.898845, 0.801698);

$q_3' = (0.597156, -1.35303, -2.31712, 0.4917,$   
-0.523572, -0.240695, 0.18148, 0.499934,  
0.521949, -0.323081, 0.0526836, 1.07398,  
-2.22627, 0.586138, 0.500031, -0.0825609,  
2.85544, -0.0171773, 1.85754, 2.34527,  
1.07706, 0.102884, 3.62728, 0.267352,  
0.505004, 0.721165, 1.97291, -0.0552101,  
1.91789, 1.36958, 1.60911, 0.317735,  
-0.702112, 1.96877, 0.00550487, -2.46876,  
1.84256, 1.20973, 0.315613, 0.0650312,  
0.782987, 0.898973, 0.807422).

## 6 结 论

本文提出了一种新的隐式曲面交互调整方法,新方法利用了隐式曲面表达式为零值面的特性,对于顶点位置调整、无约束的顶点法向调整和带约束

的顶点法向调整 3 种曲面调整方式分别建立目标函数约束,用优化方法极小化目标函数得到隐式曲面系数的变化量.新方法可以在用户进行交互调节的同时得到调整之后的隐式曲面,从而达到实时调整的目的.本文的主要工作可以概括为:(1)曲面交互调整方法适用于一般隐式曲面;(2)可以指定在隐式曲面上的任意一点进行位置或者法向的交互调整;(3)交互调整能够达到实时效果.为了更好地从整体上控制曲面的形状,我们在以后的工作中会尝试引入能量约束,以得到更好的控制效果.

## 参 考 文 献

- [1] Bajaj Chandrajit, Ihm Insung, Warren Joe. Higher-order interpolation and least-squares approximation using implicit algebraic surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 1993, 12(4): 327-347
- [2] Baraff David. Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies. *Computer Graphics*, 1989, 23(3): 223-232
- [3] Bloomenthal Jules. Polygonization of implicit surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, 1988, 5(4): 341-355
- [4] Blinn J F. A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(3): 235-256
- [5] Witkin A P, Heckbert P S. Using particles to sample and control implicit surfaces//*Proceedings of the Computer Graphics (Annual Conference Series)*, 1994, 28(2): 269-277
- [6] Hart J C, Bachta E, Jarosz W, Fleury T. Using particles to sample and control more complex implicit surfaces//*Proceedings of Shape Modeling International*. Los Angeles, California, 2002: 269-276
- [7] Schroeder W, Lorensen W, Linthicum S. Implicit modeling of swept surfaces and volumes//*Proceedings of the Visualization'94*. Washington, DC, 1994: 40-45
- [8] Wan Hua-Gen, Jin Xiao-Gang, Liu Gang, Feng Jie-Qing, Peng Qun-Sheng. Mesh fusion based on variational implicit surfaces. *Journal of Software*, 2005, 16(11): 2000-2007 (in Chinese)  
(万华根, 金小刚, 刘刚, 冯结青, 彭群生. 基于变分隐式曲面的网格融合. *软件学报*, 2005, 16(11): 2000-2007)
- [9] Stander B T, Hart J C. Guaranteeing the topology of an implicit surface polygonization for interactive modeling//*Proceedings of the Computer Graphics (Annual Conference Series)*. Los Angeles, California, 1997: 279-286
- [10] Turk Greg, O'Brien James F. Modelling with implicit surfaces that interpolate. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4): 855-873
- [11] Jorge Nocedal, Stephen J. Wright, *Numerical Optimization*. New York: Springer Press, 1999



**ZHOU Yuan-Feng**, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests include computer graphics, geometric modeling and processing.

**BO Peng-Bo**, born in 1978, Ph. D. candidate. His research interests include computer graphics, geometric

**Background**

As the developments of computer graphics and computer aided design, implicit surfaces have been increasingly used for modeling, visualizing and animation. In geometric modeling, comparing with parametric surfaces, implicit surface has three obvious advantages: one is implicit surface’s simple expression form which can be described in the form of  $f(x)=0$ , another is it is easy to judge the relative position to a special point, and the third is implicit surface has high smoothness. Implicit surfaces are useful for describing continuous and smoothly blend surfaces with complex topology, and can change the topology of surfaces easily. However, effect of coefficients of an implicit surface is not intuitive. So the main drawback of implicit surfaces is difficult to control and model implicit surfaces interactively. Based on above problems, a new interactive controlling method for implicit surfaces is

modeling.

**ZHANG Cai-Ming**, born in 1955, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. His research interests include computer graphics, computer aided geometric design, and medical image processing.

**GAO Shan-Shan**, born in 1980, Ph. D. candidate, lecturer. Her research interests include computer aided geometry design, digital image processing.

presented. For general implicit surfaces, shape controlling is essential on how to determine the coefficients of the new implicit surfaces. Position and normal of a selected vertex on surface controlling are used as two interactive tools in new method. Based on the desired position and normal vector offered by user, constraint objective functions are established based on interpolating conditions. Freedom degrees are determined by minimizing objective functions via optimization. Particle system is used for rendering implicit surfaces. This method is computationally efficient and easy to implement. Experimental results show that the method can produce ideal mesh simplification results. This work was supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China (No.2006CB303102) and the National Nature Science Foundation of China (60673003, 60573180).