

# 一种基于手绘的自由形体建模方法研究

赵娜 郭立 袁红星

(中国科学技术大学电子科学与技术系 合肥 230027)

**摘要** 提出了一种基于手绘的自由形体建模方法。通过平滑去噪、重采样、曲线拟合等操作,将输入的手绘笔画转化为均匀间隔的点序列,根据提取到的几何信息生成三维网格模型,并通过对模型进行光照渲染和纹理贴图完成具有特定形状的自由形体的绘制。实验结果表明,该方法能够简单快速地实现符合用户输入意图的三维形体建模。

**关键词** 手绘,平滑去噪,重采样,曲线拟合,三维建模,纹理贴图

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Research on Free Modeling Method Based on Free Hand Sketching

ZHAO Na GUO Li YUAN Hong-xing

(Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** A method of free modeling based on free hand sketching was proposed. Through the operations including smooth denoising, resampling, curve fitting, the sketch strokes obtained from users were transformed into sequence of evenly spaced points, from which the geometric information of target model was extracted. According to the geometric information, three-dimensional mesh model was generated. The drawing of free body with particular shape can be completed after adding texture mapping and illumination rendering to the 3d mesh model. Experimental results show that the method can be easy and quick to achieve three-dimensional shape modeling in line with users' sketching intention.

**Keywords** Sketch, Smooth denoising, Re-sampling, Curve fitting, 3D modeling, Texture mapping

目前,基于 WIMP(Windows, Icon, Menu, Pointer)交互接口的三维建模系统(例如, Maya, 3D Max, SolidWorks 等)占据着三维建模的主导地位<sup>[1]</sup>。WIMP 系统拥有技术成熟、功能强大及建模精准等优点,但由于其系统结构庞大、操作复杂,只适合专业的高级建模人员使用。而且建模人员要在充分掌握三维模型的细节信息之后,才能展开对模型的建模。然而在概念设计阶段,设计师的灵感往往是很难用确定的模型表现出来的,这时的灵感可先以手绘(sketch)的形式通过设计图纸上记录下来,待方案成熟时再进行建模<sup>[2]</sup>。

### 1 基于手绘的自由形体建模系统

本文的手绘建模系统主要由笔画(strokes)预处理和自由形体的三维绘制两部分构成。笔画预处理部分包含笔画去噪、重采样和曲线拟合 3 部分。自由形体的三维绘制由三维网格模型构建及三维模型绘制两个部分构成。图 1 为基于手绘的自由形体建模系统框架图。

#### 1.1 笔画获取

本文选择鼠标完成笔画的输入。采样得到的有序点序列即构成一个笔画。

一个笔画定义为一系列点的有序序列  $S$ :

$$S = \{p_i | 0 \leq i \leq N-1\} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  对应显示屏幕上的点。给每点设定一个速度  $Speed_i = \frac{1}{|p_i p_{i+1}|}$ , 用户作画速度越快, 则点越稀疏, 获取点的速度越快。

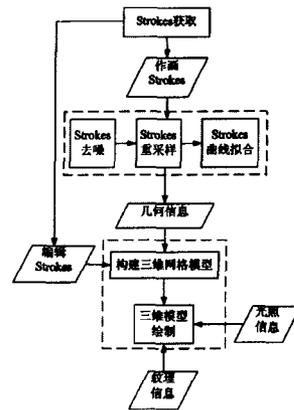


图 1 基于手绘的三维建模系统

#### 1.2 笔画预处理

##### 1.2.1 笔画去噪

手绘时手的轻微抖动等是造成噪声的一个来源,另外,在

到稿日期:2010-01-08 返修日期:2010-03-21 本文受面向移动设备的视频 3D 参数编解码在多核系统上的实现(编号:MOE-INTEL-08-08)资助。

赵娜(1986-),女,硕士生,主要研究方向为图像处理与三维建模,E-mail:zhaona@mail.ustc.edu.cn;郭立(1946-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为集成电路与系统的设计、多媒体网络视频图像处理、图像压缩与传输的理论及实现技术等;袁红星(1982-),男,博士生,主要研究方向为三维建模等。

将用户输入的笔画信息转化为一系列的屏幕坐标点时也会造成误差。屏幕的分辨率越高,误差越小<sup>[3]</sup>。要运用去噪手段将这些高频分量去掉,本文中平滑去噪。

平滑去噪是指用临近点的值对当前点的值进行修正的一种手段。对式(1)进行平滑后得到:

$$S' = \{p_i' | 0 \leq i \leq N-1\} \quad (2)$$

$$\text{式中, } p_i' = \phi \left( \sum_{j=i-M}^{i+M} w_j p_j \right) \quad (3)$$

在式(3)中  $M$  为一个合适的正整数,  $M$  越大得到的笔画越平滑。  $w_j$  为  $p_j$  的权值,需满足:

$$\sum_{j=i-M}^{i+M} w_j = 1 \quad (4)$$

由于距  $P_i$  越远的点贡献越小,  $|j-i|$  越大的  $w_j$  应该越小。

### 1.2.2 笔画重采样

用户的输入笔画速度时快时慢,造成获取的点序列时疏时密。在进行曲线拟合之前对笔画进行重采样可以使点间距比较均匀<sup>[4]</sup>。

如果两相邻采样点之间距离小于阈值,则舍去后采样得到的点;如果大于阈值,则在两点间插值得到新点。在经过平滑去噪和重采样之后,可以得到间隔比较均匀、比较平滑的手绘笔画,但是不同的手绘笔画上的点数并不相同。

### 1.2.3 笔画曲线拟合

将使用开放均匀的二次 B 样条曲线<sup>[5]</sup>拟合笔画。B 样条曲线由若干个控制点控制曲线形状,其表达式如下:

$$P(u) = \sum_{k=0}^n p_k B_{k,d}(u) \quad (5)$$

式中,  $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ ,  $2 \leq d \leq n+1$ ,  $p_k$  是输入的一组  $n+1$  个控制点。  $B_{k,d}(u)$  是 B 样条混合基函数,是次数为  $d-1$  的多项式<sup>[5]</sup>。

由式(5)可见获得拟合曲线上点  $P(u)$  的关键在于得到控制点  $p_k$ 。可以使用逆柴金细分<sup>[5,6]</sup>得到降噪的 B 样条,这种 B 样条具有均匀间隔的控制点。

逆细分算法将数据分解为细节部分和较为粗糙的近似部分。代表高频信息的细节部分多是由可以忽略的噪声组成的。柴金细分是基于二次 B 样条的,本文将近似部分作为所要拟合曲线的控制点  $p_k$ <sup>[6]</sup>。

如果将逆细分前的点记作  $q_0, q_1, \dots, q_n$ , 之后较粗糙的点记作  $p_0, p_1, \dots, p_m$ , 我们可以得到:

$$P = A \times Q \quad (6)$$

式中,  $P = [p_0 p_1 \dots p_m]^T$ ,  $Q = [q_0 q_1 \dots q_n]^T$

$$A = \begin{bmatrix} B \\ C \\ D \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -\frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & 1 & -\frac{1}{2} \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由式(6)可知,经过一次操作后的  $m$  差不多是  $n$  的一半。得到的点集  $P$  即可作为所要拟合曲线的控制点,也可以对  $P$  再进行一次逆细分操作,这样得到的曲线就更加平滑,当然也

会更加背离原笔画。

由于之前还对笔画进行了采样平滑等操作,只需要对点集  $Q$  进行一次逆细分得到控制点  $p_k$ , 就可以得到点距均匀、点数固定且与原始输入吻合的拟合曲线。

经过曲线拟合处理,笔画上的点间隔均匀,点数也可以根据需要更改。这样得到的三维模型网格大小容易控制,而且比较均匀。

## 1.3 自由形体的三维绘制

绘制出自由形体的三维模型需要目标物体的几何信息、纹理信息以及所处环境的光照信息。纹理信息和光照信息可以由用户指定或系统预先设定,重点在于如何获取符合用户手绘意图的三维模型的几何信息。

获取几何信息的直接目的是得到三维网格模型,然后通过纹理贴图 and 光照渲染进行自由形体模型绘制。

### 1.3.1 生成三维网格模型

本文默认的作图平面是  $xoy$  平面。本文提出了使用提升内点法和旋转法来生成模型的上点,从而构成三维网格模型。

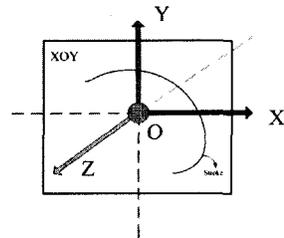


图2 默认作图平面与世界坐标系的关系

### 1.3.2 三维模型绘制

除了三维网格模型之外,自由形体三维模型的绘制还应该要有合适的光照渲染以及纹理贴图。

本文的光照渲染效果由  $LightShine()$  函数实现,其用到了3个光源,分别代表环境光、漫射光和反射光。在设置了物体的材质属性之后,便可以渲染出具有明暗变化的三维模型。三维模型的颜色可以根据选择输入笔画的颜色设置,不过需要添加纹理映射使三维模型更具有真实感。

本文建立了一个纹理素材库,其中一些在 photoshop 上作图生成,一些来自于百度图片,素材文件必须是  $2^m \times 2^n$  ( $m$  和  $n$  为正整数)像素大小的 BMP 文件。

## 2 三维网格模型的生成算法

对于横截面是圆形或环形的自由形体,如果设定用户的视平面即  $xoy$  平面垂直经过其横截面的中心,则只要给出物体在  $xoy$  平面上的轮廓线,就可以推出所要勾画物体的三维几何信息,从而得到物体的三维网格模型。下面将针对这一种自由形体的三维建模方法的算法具体展开论述。

### 2.1 提升内点法

此方法只需要用户画出一条近似闭合或闭合的曲线,作为目的模型在  $xoy$  平面上的轮廓线,系统便可以自动生成相应的三维网格模型。

图3和图4表示建模的过程。设线段  $P_i P_j$  ( $i+j=N-1$ ) 为圆形横截面在  $xoy$  上的投影,图3中根据输入笔画上的点得到一系列的内点,这些内点是通过将  $P_i P_j$  进行  $M$  等分得到的基点,  $M$  的大小将决定三维网格的疏密。

设  $P$  为图3得到的内点,它的深度值即  $z$  轴坐标  $P \cdot z =$

0。为了得到合适的三维模型,需要为  $P$  赋以合适的  $P \cdot z$  值。设  $Q$  为提升之后的  $P$ , 则  $PQ$  即为  $Q \cdot z$  的值。图 4 中内点  $P$  被提升后成为三维模型的网格顶点。将  $P_i, P_j$  上的各内点提升后应落在以  $P_i, P_j$  为直径的圆周上, 则  $PQ$  由线段  $P_i, P_j$  的长度  $length$  及  $P$  在  $P_i, P_j$  的位置决定:

$$Q \cdot z = PQ = \sqrt{pp_i^2 + pp_j^2} \quad (7)$$

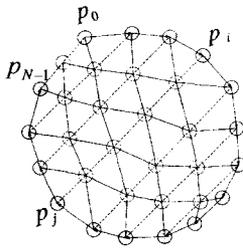


图 3 获得内点

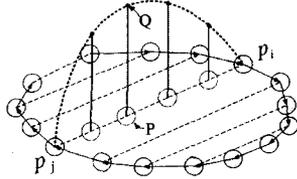


图 4 提升内点

由式(7)可知  $Q \cdot z$  值均为正, 通过上式得到的  $Q$  将连同笔画  $S$  上的点构成自由形体的正面点集。必然存在和  $Q$  一对应的点  $Q'$  连同  $S$  上的点构成另一侧表面点集。 $Q' \cdot z$  的计算公式如下:

$$Q' \cdot z = -\sqrt{pp_i^2 + pp_j^2} \quad (8)$$

图 5(a), (b), (c) 左右分别为苹果和西瓜的三维网格模型的生成过程。提升内点法不仅仅局限于轮廓大致为球型物体的建模, 只要目的模型垂直于  $xoy$  的横截面是圆形的, 并且给出目的模型在  $xoy$  平面上的轮廓线, 都可以得到物体的三维网格模型, 如图 6 显示的篮子的三维网格模型。本文可以实现对多个符合条件的物体进行建模, 如图 7 所示。

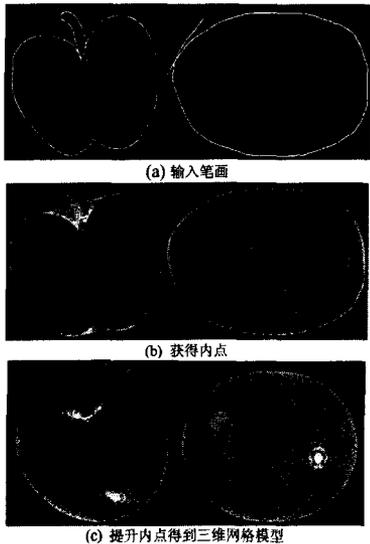


图 5 由手绘笔画到三维网格模型(提升内点法)

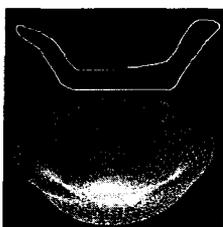


图 6 篮子的三维网格模型(提升内点法)

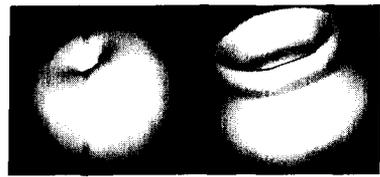


图 7 使用 AutoCAD 构建的三维模型

## 2.2 旋转法

旋转建模是指将笔画上的每一个点沿固定轨迹绕对称轴旋转一周, 从而得到目标模型的建模手段。这种建模方法适合于轴对称的物体。

首先获取对称轴。可以输入笔画指定对称轴, 也可以将输入的笔画的首尾点连线作为对称轴。本文采取第二种方法获取对称轴, 记作直线  $P_0P_{N-1}$ , 如图 8 所示。

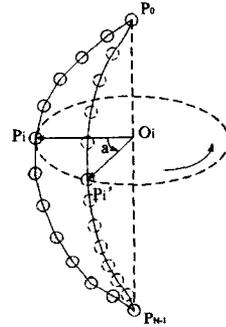


图 8 轴对称建模过程

每个点绕行的轨迹可以由输入笔画指定, 这里默认旋转路径为圆形。点  $P_i$  绕对称轴进行 360 度的旋转, 可将图 8 中的输入解释为一个棱型物体。

求得笔画上每一点  $P_i$  到直线  $P_0P_{N-1}$  的距离  $|\vec{O_iP_i}|$ , 将其作为绕行轨迹的半径  $R_i$ 。设角度  $\alpha$  为轨迹上相邻两点  $P_i$  和  $P_i'$  对应的夹角, 可以通过控制  $\alpha$  的大小来控制生成模型的网格细密程度。

## 3 模型的编辑

三维模型生成之后, 可以利用手绘笔画给予其适当的编辑操作。下面将就叶片的建模和变形进行说明。

### 3.1 叶片的三维网格模型

叶片的网格模型可以由提升内点法获得, 也可以由旋转法获得。通过旋转建模对叶片进行建模, 只需使用手绘笔画设定旋转轨迹即叶片横截面的形状。下面通过提升内点法获得叶片的网格模型。

由于叶片相对于叶梗近似对称, 可只输入叶梗一侧的轮廓线, 由图 9 中的方法生成对称的一侧轮廓线。

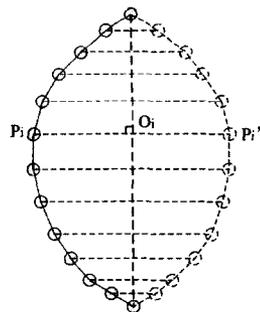


图 9 获得对称轮廓线

获取内点的方法类似于提升内点建模,内点提升的高度变为:

$$Q.z = \sqrt{(pp_i^2 + pp_j^2)} \times \partial \quad (9)$$

式中,  $\partial > 0$ ,  $\partial$  是伸缩因子, 根据我们对叶片的先验知识,  $\partial$  应取一个远小于 1 的正小数, 本实验中取  $\partial = 0.05$ 。图 10 右和下分别是叶片模型在  $yoz$  和  $xoz$  平面上的观察结果。而现实中的叶片表面是有弧度的, 为了得到更加真实的叶片模型, 需要对叶片模型进行一些变形。

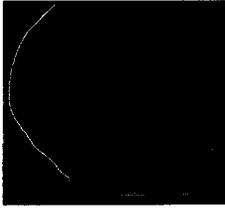


图 10 叶片的初始网格模型

### 3.2 叶片网格模型的编辑

图 11 中的  $S$  表示用户输入的第二笔笔画, 用来调整叶片的表面, 使之上凸。当然也可以输入向下凹的笔画, 是叶片下凹。 $P$  和  $Q$  分别表示  $S$  投影在叶片上表面和下表面上的曲线。设  $P, Q, S$  上对应的一组点分别为  $pi, qi, si$ , 则可根据:

$$\begin{cases} pi.z = pi.z + si.z \\ qi.z = qi.z + si.z \end{cases} \quad (10)$$

得到提升后的  $P$  和  $Q$ 。图 12 是对叶片进行下凹变形之后的结果。图右和下分别是变形之后的叶片三维网格模型在  $yoz$  和  $xoz$  平面上的观察结果。

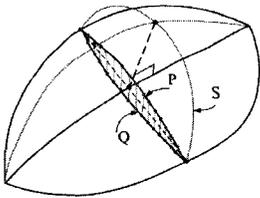


图 11 输入笔画对网格进行调整



图 12 调整后的叶片网格模型

## 4 实验结果与分析

实验硬件平台是普通的 PC 机, 主要配置为: Intel 酷睿 2 双核 CPU, 主频 2.26GHz, 系统内存 1.96GB。软件开发环境为 Visual Studio 2008, 编程语言选用基于 mfc 和 opengl 的 c++。

图 5、图 6、图 10、图 12 和图 13 给出了输入的手绘笔画与对应生成的三维网格模型。图 7、图 14—图 16 为经过纹理贴图 and 光照渲染之后的三维模型。

实验中可以在输入手绘笔画之后很快显示出创建的三维模型。如果不计入手绘输入所花费的时间, 从预处理到显示生成的三维模型所需时间如下页表 1 所列。



图 13 利用旋转法生成的酒杯三维网格模型



图 14 经过纹理贴图、光照渲染后的模型

表 1 预处理到生成三维模型的时间

模型	苹果	西瓜	叶片	杯子
时间/s	0.109	0.078	0.156	0.225

图 7 为使用 AutoCAD 构建的三维模型。为简单起见, 左图中的苹果并未绘制果柄, 模型也并未添加纹理贴图。在充分熟悉作图步骤和命令之后, 左图和右图分别耗时 29s 和 44s。

由此可见本文所提出的手绘建模方法处理时间短、操作简单, 所生成的模型具有较高的真实度。本文方法还可以对若干物体进行复合建模, 如图 15 所示, 建模时间为 0.189s。

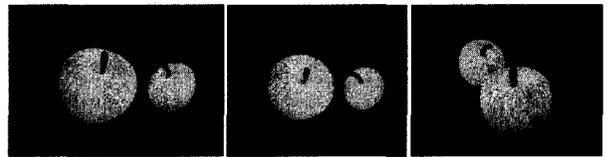


图 15 由内点提升法生成的在不同视角下的复合模型

可以从图 15—图 18 看到, 在添加了合适的纹理和光照效果之后, 本文所生成的自由形体模型具有一定的真实感, 达到了预期的结果。图 16—图 18 为使用本文的建模方法构造的在不同视角下的三维模型。



图 16 添加编辑操作后在不同视角下的叶片

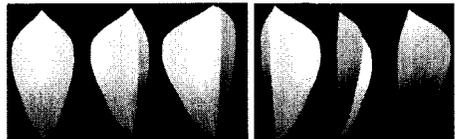


图 17 与叶片类似的花瓣建模

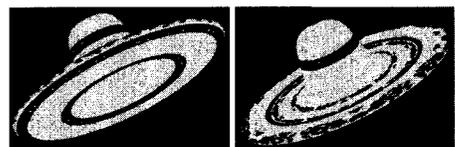


图 18 旋转得到的草帽模型在不同视角下的效果

**结束语** 本文通过对用户的手绘输入进行去噪、重采样以及曲线拟合等操作, 并结合提升内点、旋转等三维建模方法, 实现了特定物体类型的自由形体建模。

本文提出的自由形体建模方法告别了复杂的操作模式——只需要简单的一笔两笔便可勾画出具有真实感的物体模型。但是也有局限性, 用户不能方便地在已生成的模型上

(下转第 282 页)

图2所示电路中标出了每个元件的标称值,其中电阻和电容的容差分别为5%和10%。假设R2,R3,C1和C2发生故障,分别用R2↑,R2↓,R3↑,R3↓,C1↑,C1↓,C2↑和C2↓来表示比标称值高或低50%。

在文献[3]中,用到了一个4输入、6隐层和8输出的网络。结果表明NF(no-fault class)和R2↑的诊断效果不理想。本文基于GA的FNN则包括4输入、32模糊化层、8推理层和8输出。按上述算法对网络进行训练后的结果表明NF(no-fault class)和R2↑能被准确分类,而且对测试数据的诊断达到了100%。

图3是一个更复杂的电路,以进一步对诊断效果进行比较说明,表1列出了用于实验的故障类型和故障值。

表1 故障类型

Fault class	Nominal value	Faulty value
C1↑	5nF	10nF
C1↓	5nF	2.5nF
C2↑	5nF	15nF
C2↓	5nF	1.5nF
R1↑	6.2kΩ	15kΩ
R1↓	6.2kΩ	3kΩ
R2↑	6.2kΩ	18kΩ
R2↓	6.2kΩ	2kΩ
R3↑	6.2kΩ	12kΩ
R3↓	6.2kΩ	2.7kΩ
R4↑	1.6kΩ	2.5kΩ
R4↓	1.6kΩ	0.5kΩ

文献[3]采用了一个5输入、16隐层和13输出的BP神经网络,它对测试向量的正确分类达到了95%。本文的GA-FNN包含5输入、65模糊化层、13推理层和13输出。由于此网络不再是一个标准的全联接网络,因此如果采用传统的BP网络来训练,所需要的隐含层的神经元就比较多,收敛速度会相当慢,而且极易陷入局部收敛。采用上述遗传算法来训练模糊神经网络,收敛速度明显提高,同时能避免陷入局部极小值。图4给出了两者的收敛曲线。显然,BP网络迭代的次数超过了100000次,而后者大约50000次就达到了收敛。

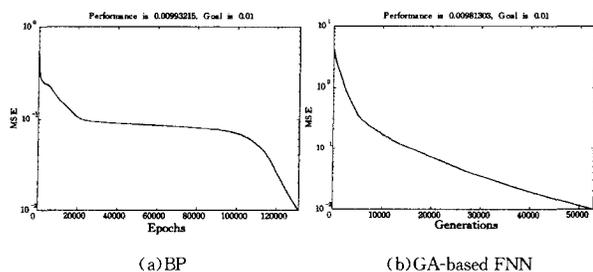


图4 BP网络和GA-FNN的收敛曲线

仿真试验结果表明,不仅故障诊断的速度得到提高,而且

故障覆盖率包括了文献[3]中误诊的C2↓,R1↑,R4↓。

**结束语** 提出了一种采用结合遗传算法的模糊神经网络对模拟电路进行故障诊断的新方法。该方法采用基于小波计算的主成分分析方法对网络的训练样本进行预处理,提取优化向量后利用遗传算法对模糊神经网络进行训练。对两个模拟电路的诊断实例表明该方法故障覆盖率高,能有效诊断出同类方法误诊的故障类型。

## 参考文献

- [1] Spain R, Upadhyaya S. Linear circuit fault diagnosis using non-morphic analyzers [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process, 1997, 44(3): 188-196
- [2] He Yigang, Sun Yichuang. A neural-based L1-norm optimization approach for fault diagnosis of nonlinear circuits with tolerances [J]. IEE Proc., Circuits Devices Syst., 2001, 148(4): 223-228
- [3] Aminian F, Aminian M, Collins H W. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas, 2002, 51(3): 544-550
- [4] He Yigang, Tan Yanghong, Sun Yichuang. Wavelet neural network approach for fault diagnosis of analogue circuits [J]. Circuits Device Syst., 2004, 151(4): 379-384
- [5] 袁海英, 陈光福, 谢永乐. 故障诊断中基于神经网络的特征提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 90-94
- [6] 金瑜, 陈光福, 刘红. 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(9): 1600-1604
- [7] 王建芳, 李伟华. 基于扩展T\_S模型的PSO神经网络在故障诊断中的应用[J]. 计算机科学, 2009, 36(9): 224-226
- [8] Higgins C M, Goodman R M. Fuzzy rule-based network for control [J]. IEEE Trans Fuzzy System, 1994, 2(1): 82-88
- [9] Nie J. Constructing fuzzy model by self-organizing counter propagation network [J]. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, 1995, 25(6): 963-970
- [10] Catelani M, Fort A. Soft fault detection and isolation in analog circuits; some results and a comparison between a fuzzy approach and radial basis function networks [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas, 2002, 51(2): 196-202
- [11] 乔俊飞, 王会东. 模糊神经网络的结构自组织算法及应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 703-707
- [12] Guo Guanqi, Yu Shouyi. Stochastic analysis and convergence velocity estimation of genetic algorithms [J]. Journal of Central South University of Technology, 2003, 10(1): 58-63
- [13] 黄勤, 颜海松, 李楠. 改进的遗传BP网络在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 计算机科学, 2009, 35(8): 104-106
- [14] Michalewicz Z. Genetic Algorithms+Data Structure=Evolution Program [M]. New York: Springer-Verlag, 1996

(上接第265页)

进行细节添加、自由移动或者切割等操作,这样就限制了用户创作灵感的发挥。在以后的工作中将尝试对系统功能进行扩展,以创建出更加复杂多变的自由形体三维模型。

## 参考文献

- [1] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. A taxonomy of modeling techniques using sketch-based interfaces [J]. Eurographics 2008 state of the art report, 2008
- [2] Olsen L, Samavati F F, Costa Sousa M, et al. Sketch-based modeling: A survey [J]. Computer & Graphics, 2009, 33(1)
- [3] Cheon S U, Han S. A template-based reconstruction of plane-symmetric 3D models from freehand sketches [J]. Computer-Aided Design, 2008, doi:10.1016/j.cad.2008.07.006
- [4] 吴孔银, 王立涛, 汪洪峰, 等. 手绘草图识别技术及其建模方法研究[J]. 现代设计技术, 2007, 24(4): 25-29
- [5] [美]Hearn D, Baker M P. 计算机图形学(第三版)[M]. 蔡士杰, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007
- [6] Samavati F F, Bartels R H. Local filters of bspline wavelets [C]// Proceedings of International Workshop on Biometric Technologies (BT 2004). Canada: University of Calgary