

# 基于数位笔压感的三维手绘笔触表达与深度转换

宣翠仙<sup>1</sup> 李强<sup>2</sup> 龚永坚<sup>1</sup> 楼建忠<sup>1</sup>

(1. 金华职业技术学院信息工程学院, 金华 321017; 2. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 针对当前手绘系统中数位笔压感信息应用的局限性, 提出了基于压感信息的三维手绘笔触表达与深度转换方式。该方式以多线段和圆的疏密度修正方式表现压力笔触, 定义了压力作用程度算式, 用任意点法向压力估算简化方法判定平面上和空间曲线的笔触影响区域。通过端点锁住和抛物线压力转换方法优化压力曲线单调性, 实现了压力笔触到深度坐标及影响半径的转换, 并将结果应用到汽车三维手绘系统(压力版)中。实验测试结果表明数位笔压力信息能有效转换为三维手绘曲线的深度信息, 计算时间短, 可靠性高, 可视化效果明显。

**关键词:** 数位笔; 压感; 三维手绘; 深度转换

**中图分类号:** TP311; TP334.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0366-06

## Depth Conversion and Expression of 3D Free-hand Stroke Based on Pressure-sensitive Digital Pen

Xuan Cuixian<sup>1</sup> Li Qiang<sup>2</sup> Gong Yongjian<sup>1</sup> Lou Jianzhong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China

2. School of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The paper focuses on the pressure information application of digital pen in sketching system and proposes a novel design pattern based on the direct conversion from the pressure information to the three-dimensional stroke depth. The method firstly defines the curve modification region and the pressure scale, determines the stroke influence area of the planar or spatial curve with the simplified method of normal pressure estimation on each node of stroke point. Then the pressure-sensitive stroke was smoothly shown with the pressure information by width and color. Finally, the pressure-sensitive information was converted to the depth information of a planar stroke in order to create a three-dimensional stroke with the endpoint locked and the parabolic pressure conversion methods. The conversion method based on the pressure-sensitive digital pen was applied in the new version of automotive three-dimensional free-hand sketching system. The experimental results show that the pressure information of digital pen can be effectively converted into the depth information of a planar stroke, which can be changed into a spatial curve directly. The calculation time of the conversion was short, and the visualization effect was satisfied obviously. In addition to the application during the concept design phase of the automotive 3D sketching modeling, this conversion can also be applied to mechanical design and other engineering design areas.

**Key words:** digital pen; pressure-sensitive; 3D-stroke; depth conversion

### 引言

数字手绘设备, 由于能快速表现用户设计创意,

在当前汽车造型设计等领域得到广泛应用。数位笔作为手绘系统中进行数字绘画创作的基本输入设备, 与 VR 虚拟现实专用设备相比, 具有价格低、维

护成本低等优点,因而许多工业设计软件提供了支持数位笔手绘功能的接口,如 Alias、AutoCAD、ThinkDesign 等<sup>[1]</sup>。

数位笔通常与数位板/数位屏匹配,通过压感笔的压力传感装置,在计算机屏幕上模拟各种画笔效果。数位笔的压力感应功能,传承了传统用笔的习惯,大大提高了造型设计的效率和表现力。当前市场上的数位笔如 Wacom 的影拓五代,笔尖最高压感级别已高达 2048 级,能够在距离数位板/屏 5 mm 外的地方对内容进行识别,感知线条的粗细变化、笔触的轻重缓急等<sup>[1]</sup>。通过文献比较,发现当前数位笔的应用主要集中于通过手绘方式进行草图创作<sup>[2-7]</sup>,对压力感应信息开发利用较少,且多用于点阵图形的系统中,通过压力表现颜色的深浅和笔触的粗细或区域的大小等。从数位笔压感信息获取结果看,文献[8-10]中获得的是单位动态力的信息变化,对笔交互过程信息获取不完整。文献[11]通过采用 5 力传感器组合实现了手写三维力信息的获取,但手写过程和视觉反馈分开,实时性较差。文献[1]采集了较完整的三维力信息,但未提到效果对三维空间笔触的影响。从数位笔压感信息应用的空间维度看,主要有 2 种表现方式:第 1 种是在 2D 图形软件中通过数位笔的不同压感体现矢量线条的粗细、浓密等程度<sup>[1]</sup>;第 2 种是在 3D 软件中,将由不同压感生成的材质、纹理等 2D 图形以贴图形式应用到三维造型表面。这 2 种表现形式都是直接针对 2D 图形的笔触应用<sup>[1,12-13]</sup>,压力并未直接影响三维空间笔触的深度。

因此,为更快速、有效地将数位笔压力感应信息应用于三维手绘笔触空间信息的生成,本文在对数位笔压力感应信息与手绘笔触研究的基础上,结合前期对投影、曲面相贯方式生成三维空间笔触的研究<sup>[6,14-18]</sup>,提出基于数位笔压感的三维手绘笔触深度表达方法与转换模式,同时对生成后的笔触处理进行优化分析,并在汽车造型设计中应用。

## 1 压力笔触表现形式

压力笔触是指数位笔在数位板/数位屏上依据时序采样和不同笔压,在落笔和抬笔之间划过轨迹时采集的一组点数据,有长度、粗细、虚实、压力等信息的变化。

### 1.1 笔触数据源提取方式

提取笔触数据源时,一般采用 2 种方法:基于点阵的特征提取和基于矢量的特征提取。点阵数据随着笔触变大计算量增加,获取和识别困难,且 CAD 系统在对像素点采集时需要经过专门转换。而矢量

笔触中的每个数据点都代表笔触特征,数据获取相对容易,且笔触增大时数据点增加不多,计算速度较快,实时性较好<sup>[12]</sup>。因此就单一笔触而言,本文采用矢量笔触进行特征抽取,并将采集后的数据点通过 Douglas Pecucker 算法<sup>[13]</sup>进行稀释和平滑处理,以保留特征点,减少数据点总量。

针对数据源单笔触的笔触点稀释和平滑,改进的 Douglas Pecucker 算法基本流程为:

(1)将笔触的首尾两点并连成直线。

(2)求取笔触曲线上的任意点到该直线的最大距离,同时设定限差。

(3)比较最大距离与限差的大小:若最大距离大于(等于)限差,则保留对应数据点,以该点为界将曲线分为两段,返回步骤(1),否则舍去曲线上的全部中间点,输出稀释后的压力笔触数据点。

### 1.2 压力笔触表现方式

用有序离散点来标识笔触时,点之间存在明显的间断信息,笔触光顺度低。因此,可以采用多线段、圆等不同方式来表现笔触。

#### 1.2.1 多线段

用多线段表示的方法是指将数据点用直线连接,形成一个多段线,如图 1 中笔触  $a_1$  和  $a_2$  所示(黑色笔,线宽为 3)。由于绘制一个笔触时,采样频率一定,点的疏密也反映了运笔速度,在转弯处运笔稍慢,点密集;在平滑处运笔速度快,点稀疏。因此,总体上曲线较光顺。图 1 中笔触  $b_1$  和  $b_2$  所示为线宽为 19 时的情况。笔触头尾部为圆晕,笔触粗实厚重,且笔触也较光顺。笔触作为多线段的表現方式用于计算机程序设计语言独立开发的版本中较实用,用于 CAD/CAS 系统进行二次开发的版本中笔触宽度会受到一定限制。

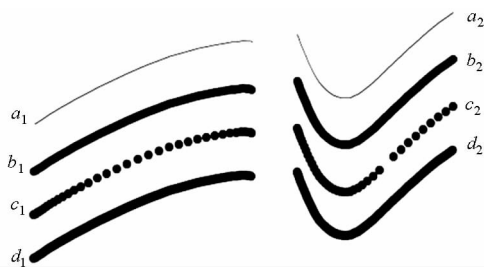


图 1 笔触的表现方式

Fig. 1 Expression of a stroke

#### 1.2.2 圆

可以用一定半径的圆表示序列离散点,如图 1 中  $c_1$  和  $c_2$  所示(线宽为 19)。但从图中可以看出,用离散的圆表示笔触的数据点时会出现断续笔触的情况。为此,考虑离散的圆与圆之间用  $n$  个圆来填充,则能达到较好的连续效果,如图 1 中  $d_1$  和  $d_2$  所

示。 $n$ 的取值则根据距离确定。而圆的半径可以通过压力来转换,这样就可以绘制不同粗细和颜色深浅的压力笔触,如图2所示。



图2 压力笔触的粗细和颜色深浅表现方式

Fig.2 Thickness and color depth expression of pressure-sensitive stroke

对于笔触光顺程度的处理,采用下面的方法。设平面屏幕上2个连续的笔触点分别为 $P_{s,i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 和 $P_{s,i}(x_i, y_i)$ , $n$ 的取值算式为

$$n = \max(|x_i - x_{i-1}|, |y_i - y_{i-1}|) \quad (1)$$

则循环步长 $k_s$ 为

$$k_s = k_d/n \quad (2)$$

式中 $k_d$ 为疏密度,可以控制笔触的光顺程度。每个填充圆的圆心坐标为

$$\begin{cases} x_{sj} = x_{i-1} + (x_i - x_{i-1})k_s j \\ y_{sj} = y_{i-1} + (y_i - y_{i-1})k_s j \end{cases} \quad (j \in (0, n)) \quad (3)$$

在图3中,笔触 $a_1$ 和 $a_2$ 为原始数据点圆,笔触 $b_1$ 和 $b_2$ 为疏密度 $k_d=1$ 时的笔触,光顺度很好。而随着 $k_d$ 的增加,笔触绘制速度变快,笔触变得粗糙,如笔触 $c_1$ 和 $c_2$ 为疏密度 $k_d=5$ 时的笔触,光顺效果适中。而笔触 $d_1$ 和 $d_2$ 为疏密度 $k_d=10$ 时的情况,笔触边缘已出现明显的凸凹情况,很不光顺。而疏密度 $k_d < 1$ 时,因绘制的圆过多而导致笔触绘制速度很慢,将会出现迟滞现象,建议在实时手绘系统中不采用。

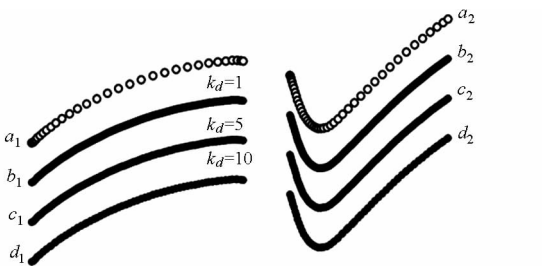


图3 疏密度的差异

Fig.3 Density difference of pressure-sensitive stroke

## 2 压感信息的表达

### 2.1 压力作用程度表达式

设数位笔压力感应值在笔触中任意一点中的读取范围为整数 $P_{io} \in (0, 255)$ ,调整压力大小的比例尺为 $k_p \in (0, 1.0)$ ,其中默认值为0.5,值的大小可以通过定义的组合键增大或减小。因此,对于笔触中的某一点,压力转换后的实际作用半

径可表示为

$$r_i = Ck_p P_{io} \quad (4)$$

式中 $C$ ——转换常数,其值与系统屏幕投影变换有关,可简便估算一个常数

$P_{io}$ ——笔触中任意一点 $P_i$ 的压力初始值

### 2.2 压力笔触影响范围估算

压力笔触由一系列有序点组成,每一点的压力不同。如图4所示,设曲线上任一点 $P_i$ ,以作用半径 $r_i$ 画一个圆,该圆与笔触上 $P_i$ 点的法向方向分别交于 $P_{ia}$ 和 $P_{ib}$ 两点,其矢量 $P_i P_{ia}$ 和 $P_i P_{ib}$ 为笔触上 $P_i$ 点的修改方向,作用半径 $r_i$ 为修改的距离。另设笔触上 $P_i$ 点的相邻两点分别为 $P_{i-1}$ 和 $P_{i+1}$ ,作用半径分别为 $r_{i-1}$ 和 $r_{i+1}$ ,同理,它们在法向方向上的对应点分别为 $P_{i-1,a}$ 、 $P_{i-1,b}$ 、 $P_{i+1,a}$ 和 $P_{i+1,b}$ 。在给定修改方向的前提下,笔触上的点 $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 和 $P_{i+1}$ 将被点 $P_{i-1,a}$ 、 $P_{ia}$ 、 $P_{i+1,a}$ 取代,或被 $P_{i-1,b}$ 、 $P_{ib}$ 、 $P_{i+1,b}$ 取代。由点 $P_{i-1,a}$ 、 $P_{ia}$ 、 $P_{i+1,a}$ 、 $P_{i-1,b}$ 、 $P_{ib}$ 和 $P_{i+1,b}$ 所构成的外曲线区域就是笔触的影响区域。

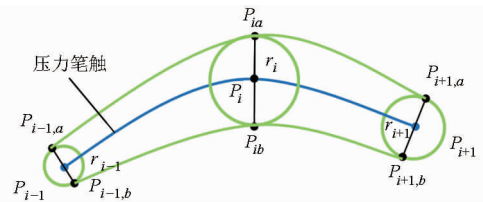


图4 压力笔触影响区域

Fig.4 Influence area of pressure stroke

对于笔触曲线上任意一点的坐标和法向,如果笔触采用三次 $\beta$ 样条曲线或三次NURBS曲线生成,则可采用相应的差值算法计算,并沿着法向方向进行 $r_i$ 偏移。这种计算方法虽然精确,但计算量比较大。因此本文采用下面的简化算法进行估算。

采用笔触表现为多线段的方式,假设平面压力笔触由折线段所组成,如图5所示,设3个连续点的坐标分别为 $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $P_i(x_i, y_i)$ 和 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ ,两点之间的距离计算公式为

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2} \end{cases} \quad (5)$$

设 $P_1(x_{p1}, y_{p1})$ 和 $P_2(x_{p2}, y_{p2})$ 都是半径为 $r_i$ 的圆周上的点,从 $P_i$ 点开始,分别沿着矢量 $P_{i-1} P_i$ 和

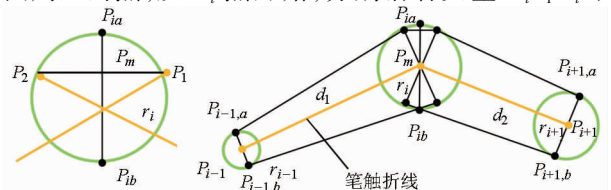


图5 压力笔触影响区域的简化

Fig.5 Simplification for influence area of pressure stroke

$P_{i+1}P_i$  方向得到这两点。 $P_1$  和  $P_2$  坐标计算式为

$$\begin{cases} x_{p_1} = x_i + k_1 \Delta x_1 \\ y_{p_1} = y_i + k_1 \Delta y_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{p_2} = x_i + k_2 \Delta x_2 \\ y_{p_2} = y_i + k_2 \Delta y_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中  $k_1 = r_i/d_1$   $k_2 = r_i/d_2$

$P_1P_2$  线段中点坐标  $P_m(x_m, y_m)$  为

$$\begin{cases} x_m = x_i + \frac{1}{2}(k_1 \Delta x_1 + k_2 \Delta x_2) = x_i + \frac{1}{2} \Delta x_m \\ y_m = y_i + \frac{1}{2}(k_1 \Delta y_1 + k_2 \Delta y_2) = y_i + \frac{1}{2} \Delta y_m \end{cases} \quad (8)$$

设点  $P_i$  到 midpoint  $P_m$  的距离为

$$d_3 = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta x_m^2 + \Delta y_m^2} \quad (9)$$

则  $P_{ia}(x_{ia}, y_{ia})$  及  $P_{ib}(x_{ib}, y_{ib})$  坐标为

$$\begin{cases} x_{ia} = x_i + k_3(x_m - x_i) \\ y_{ia} = y_i + k_3(y_m - y_i) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_{ib} = x_i + k_3(x_i - x_m) \\ y_{ib} = y_i + k_3(y_i - y_m) \end{cases} \quad (11)$$

其中  $k_3 = r_i/d_3 = 2r_i/\sqrt{\Delta x_m^2 + \Delta y_m^2}$ , 将式(8)代入算式(10)、(11)中, 得到

$$\begin{cases} x_{ia} = x_i + k_4 r_i \\ y_{ia} = y_i + k_5 r_i \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{ib} = x_i - k_4 r_i \\ y_{ib} = y_i - k_5 r_i \end{cases} \quad (13)$$

其中  $k_4 = \Delta x_m / \sqrt{\Delta x_m^2 + \Delta y_m^2} = 0.5 \Delta x_m / d_3$ , 同理,  $k_5 = 0.5 \Delta y_m / d_3$ 。由式(12)、(13)可以估算  $P_i$  点在法向方向上的压力影响, 计算量减小。

将此方法引伸到空间曲线, 计算方法一样, 这里不再赘述。

### 3 压力转换为深度信息

#### 3.1 压力曲线单调性处理

原始的压力矢量笔触经过稀释和平滑后, 曲线上数据点压力会变得很均匀。但对于单一压力矢量笔触, 由于手绘笔触受设计师运笔习惯的影响, 其笔触的压力值也是呈波浪形的, 是非单调曲线。因此压力转换为深度信息, 关键是使压力曲线变成一条单调曲线, 可以将压力转换成深度, 且曲线方向可控。

在二维视图中, 绘制 1 个笔触后, 其压力信息如图 6 所示, 则笔触的压力、方位角和倾角曲线显示如图 6 所示。在  $X-P$  曲线图中, 曲线 1 为原始笔触曲线; 曲线 2 为原始笔触压力曲线; 曲线 3 为原始数据压缩后的压力曲线; 曲线 4 为均值为零时的压力曲线; 曲线 5 为以首尾点压力连线作为均值线且均

值为零时的压力曲线; 曲线 6 为采用均值法(曲线 4)处理后, 以压力的均方根值为弦高且另外两点通过首尾点的圆弧压力曲线; 曲线 7 为采用端点锁住法(曲线 5)处理后, 以压力的均方根值为弦高且另外两点通过首尾点的抛物线压力曲线。

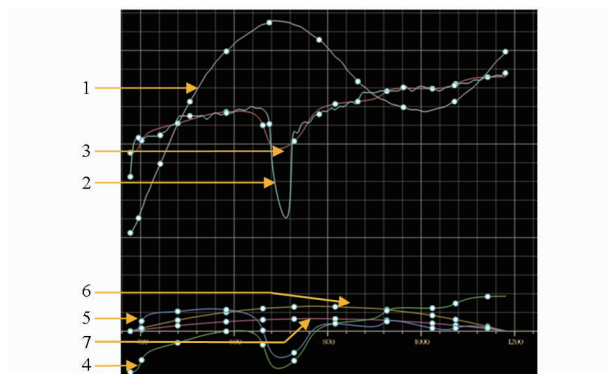


图 6 手绘笔触的压力曲线

Fig. 6 Pressure curve of pressure-sensitive stroke

由压力曲线可以看出, 笔触经过压缩后, 压力曲线变得很均匀。而采用端点锁住的方法, 可以很好地控制压力的起始点, 而不受运笔差异的影响。运用圆弧或抛物线拟合, 可以使压力曲线变成一条单调曲线, 可以将压力转换成深度, 且曲线方向可控。

#### 3.2 压力转换为深度坐标

在进行三维手绘时, 得到的笔触点序列是二维点序列, 即  $P_i(x_i, y_i) (i=0, 1, \dots, n-1)$ ,  $n$  为笔触点的个数, 但同时每个点还可以获得压力、方位角等信息。且笔的着力相对屏幕有向里用力和向外释放的两个方向, 因此用正压力方向和负压力方向分别表示, 正好与点  $P_{ia}$  和  $P_{ib}$  相对于  $P_i$  代表着截然相反的两个方向匹配。

假设进行三维手绘时, 当前工作平面为  $w$ 。压力信息可以直接转换成垂直于工作平面的深度信息, 如图 7a 红色曲线  $d$ , 它位于  $n$  平面上, 而  $n$  平面与工作平面  $w$  垂直, 两平面的交线为  $t$ , 如图 7a 中的虚线所示。绿色曲线为工作平面  $w$  上的手绘笔触  $s_2$ 。由  $n$  平面上的深度曲线  $d$  和工作平面  $w$  上的笔触  $s_2$  合成一条实际的空间笔触  $s_3$ , 如图 7a 中黑色曲线所示。如果工作平面  $w$  与屏幕平行, 如图 7b 所

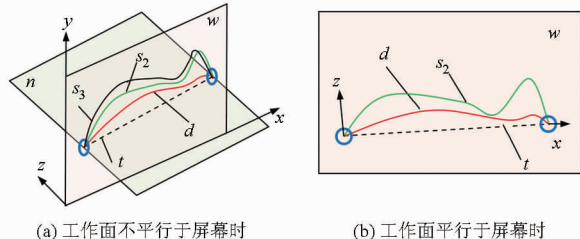


图 7 压力转换成深度信息时的工作面

Fig. 7 Working plane during pressure converted into depth information



示,实际情况深度曲线是不可见的,且空间笔触 $s_3$ 与工作平面 $w$ 上的手绘笔触 $s_2$ 重叠。因此,此时以笔触起点为原点,以交线 $t$ 为 $x$ 轴,绘制 $n$ 平面上的深度曲线 $d$ 。深度方向由 $z$ 控制, $z$ 代表正压力方向, $-z$ 代表负压力方向。

### 3.3 压力转换为影响半径

三维手绘过程中,笔触上施加压力变化时,会对原始笔触的深度产生影响,起到修正作用。对当前工作平面上的二维笔触而言,当施加压力笔触时,可以根据施加压力的法线方向和大小,在压力施加段对原始的笔触进行修改。如图8为施加正压力时,原始笔触被修改成红色曲线,而两端的桔色过渡段则保持与原来笔触平滑过渡。图9为施加负压力时压力修改后的笔触变化。

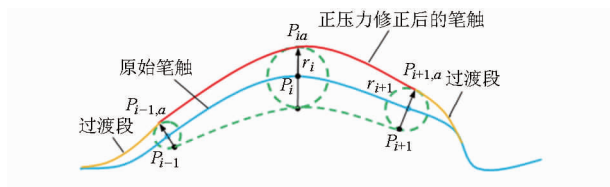


图8 正压力修改笔触

Fig.8 Modification with positive pressure

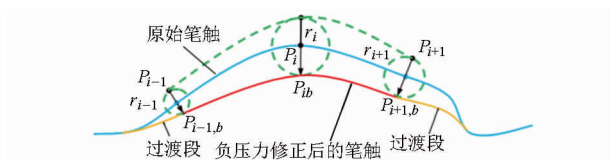


图9 负压力修改笔触

Fig.9 Modification with negative pressure

## 4 压力笔触绘制测试

以自主开发的“基于数位笔压感的汽车三维手绘系统(压力版)”进行压力笔触绘制测试。系统开发语言为 Visual C++, 测试选用的数位笔为 Wacom 新帝 13HD DTK-1300/K0-F 型液晶数位屏,触控笔为 0.005 mm/点,压感 2 048 级。测试前先对压力相关的键盘和数位屏独立按钮进行定义,测试过程选用正压力测试。

### 4.1 压力转换为空间曲线深度

在二维视图使用正压力模式绘制 2 条笔触,如图 10 所示。进入三维模式,选择合适视角则看到 2 条空间曲线,如图 11 所示。

由于默认工作平面在  $XZ$  平面内,因此图 10 所绘制的曲线应在  $XZ$  平面内,但从图 11 看到 4 条对称于  $XZ$  屏幕的曲线,是因为默认状态时,镜像功能处于开启状态,深度转换功能也处于开启状态,深度转换采用的是端点锁住和抛物线压力转换方法。

通过工作面平移与旋转,基于数位笔压力转换为笔触深度信息的汽车模型如图 12 所示。

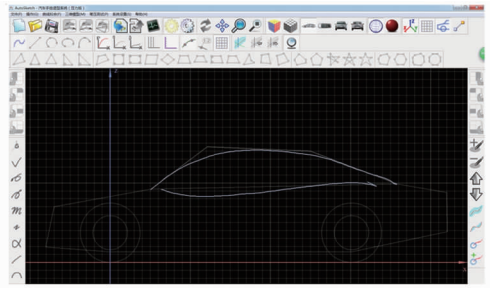


图10 绘制的正压力弧线笔触

Fig.10 Arc-shaped pressure-sensitive stroke with positive pressure

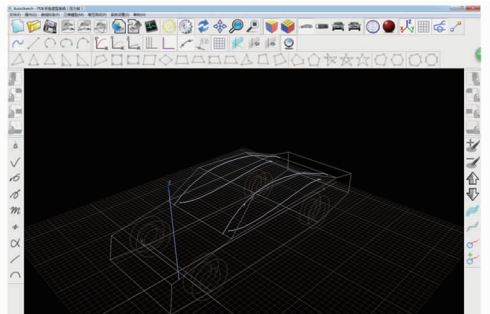


图11 压力转换成Y坐标值的空间曲线

Fig.11 Space curve with pressure-sensitive information converted into Y coordinate value

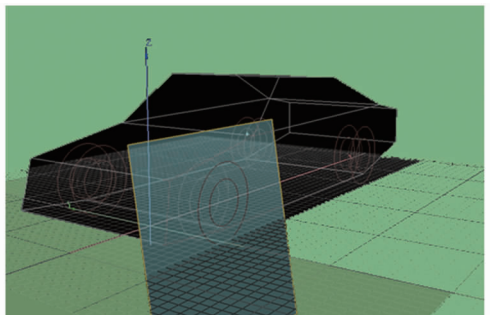


图12 基于数位笔压力深度转换的汽车手绘模型

Fig.12 Automobile sketching model based on converting digital pen pressure to stroke depth

### 4.2 笔触识别用户测试

选用 5 组汽车造型设计师,基于数位笔压感转换为笔触深度的三维曲线生成方法,对 5 组用户绘制的汽车模型图进行笔触识别。识别时间、平均错误率测试结果如表 1 所示。测试效果表明,系统中笔触的识别效果较好,所需时间较短,准确率高。

表1 用户测试结果

Tab.1 Testing result of user

序号	总笔画数	最终曲线数/ 二次曲线数	平均错误率/%	识别时间/ min
1	54	35/31	1.84	3.8
2	68	47/40	2.41	5.0
3	50	38/35	1.87	3.8
4	66	42/38	2.35	4.6
5	51	37/33	1.95	4.0

## 5 结束语

针对基于数位笔压感的三维手绘笔触表达,对矢量压力笔触进行了光顺处理的方法优化。将压感信息直接转换为深度坐标、影响半径等信息,并通过端点锁住压力转换方法、抛物线压力转换方法,直

观、快速地实现了压力信息到深度信息的转换,在汽车造型设计测试中的效果表明,相比压感信息转换为二维图像及三维贴图更直接,实时性好。测试中发现,笔触的表现形式中,曲线用圆表现更为光顺,但从算法计算量看,对于直线或折线,若选用点或多线段方式表示,计算量将减小。

## 参 考 文 献

- 1 罗健飞,吴宝元,申飞,等.支持笔交互的手写设备设计与实现[J].仪器仪表学报,2012,33(9):2115-2124.  
LUO J F, WU B Y, SHEN F, et al. Design and implementation of the handwriting device supporting pen-interaction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2115-2124. (in Chinese)
- 2 焦斌.智能图形图像数位板系统的应用研究[J].郑州航空工业管理学院学报:社会科学版,2005,24(3):150-151.  
JIAO B. Study on the application of the pen table system of intelligent graphic picture [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management: Social Science Edition, 2005, 24(3): 150-151. (in Chinese)
- 3 丁展.基于手绘的交互方式与三维建模研究[D].杭州:浙江大学,2008.  
DING Z. Research on interaction and 3D modeling based on freehand sketching [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- 4 LI Q, Zhang X F, ZHANG C F. 3D sketching in autosketch [C] // 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011: 425-428.
- 5 XUAN C X, G Y J, LI Q. Research progress of 3D style design based on sketching [C] // Applied Mechanics and Materials, 2013: 423-426.
- 6 XUAN C X, GONG Y J, LI Q, et al. Study on 3D freehand stroke creation [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(5): 1-13.
- 7 SEOK-HYUNG Bae, RAVIN Balakrishnan, KARAN Singh. I love sketch: as-natural-as possible sketching system for creating 3D curve models [C] // Proceedings of the 21th Annual ACM Symposium on UIST, 2008: 151-160.
- 8 KHOLMATOV A, YANIKOGLU B. Susig: an on-line handwritten signature database, associated protocols and benchmark results [J]. Pattern Analysis & Applications, 2009, 12(3): 227-236.
- 9 QIN Y, YU C, JIANG H, et al. Pen: enabling authenticated pen and touch interaction on tabletops and Surfaces [C] // ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, 2010: 283-284.
- 10 邢冲,吴仲城.基于三维力信息的笔交互毛笔书法效果表达[J].计算机系统应用,2009,18(10):144-147,31.  
XING C, WU Z C. Handwriting representation of chinese brush calligraphy based on three-dimension force information [J]. Computer Systems & Applications, 2009, 18(10): 144-147, 31. (in Chinese)
- 11 WANG D, ZHANG Y, YAO C, et al. Toward force-based signature verification: a pen-type sensor and preliminary validation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(4): 752-762.
- 12 刘刚,司永胜,冯娟,等.农林作物三维重建方法研究进展[J].农业机械学报,2014,45(6):38-46.  
LIU G, SI Y S, FENG J, et al. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 38-46. (in Chinese)
- 13 赵鹏,朱伟伟,吴献文,等.融合熵和势能的手绘草图特征描述方法[J].华南理工大学学报:自然科学版,2014,42(5):122-127.  
ZHAO P, ZHU W W, WU X W, et al. Feature description method for freehand sketch by combining entropy and potential energy [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(5): 122-127. (in Chinese)
- 14 MASRY M, LIPSON H. A sketch-based interface for iterative design and analysis of 3D objects [C] // Proceedings of Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces, 2005: 109-118.
- 15 XU X, DOUGLAS D H, PEUCKER T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature [J]. The Canadian Cartographer, 1973, 10(2): 112-122.
- 16 LI Q, QI N, GONG Y J. An algorithm of multi stroke combination in the automotive styling [C] // 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, 1: 417-420.
- 17 LI Q, WANG X, QI N, et al. Surface matching by using the simple strategy in the application of automotive styling [C] // 2010 International Conference of Information Science and Management Engineering, 2011, 2: 253-256.
- 18 龚永坚,宣翠仙,楼建忠,等.基于数位笔压感的汽车三维手绘系统研究[J].农业机械学报,2015,46(8):314-318,288.  
GONG Y J, XUAN C X, LOU J Z, et al. Research on 3D automotive sketching system based on pressure-sensitive of digital pen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 314-318, 288. (in Chinese)