

基于分层制作的三维汉字构建

李仲阳

泥宗涛

(湖南师范大学电子与信息工程系,长沙 410081)

(华为技术有限公司,深圳 51800)

摘要 目前,三维汉字图象的构建主要是基于“扫掠”原理,即用变化的截面沿汉字笔划中心线进行“扫掠”来形成立体笔划,它的主要缺点是难以表达变化丰富的汉字笔划,数据量也庞大,为此,基于快速成型的分层制作原理,提出了用二维汉字来构建三维汉字的一种新方法,即先将三维汉字笔划视为一些二维汉字笔划层面沿高度方向的叠加,然后通过采样二维汉字基本笔划轮廓线点列来构造它的 Voronoi 图,由此来自动生成它的不同层面的等距线,再以这些不同层面的轮廓线作为骨架,采用三次 Bezier-B 混合样条曲面拟合来形成立体笔划,最后将它们组合,构成三维汉字,并以一个三维汉字的构建实例来说明该算法的有效性,构建结果表明,该方法能更丰富地表现汉字笔划,同时能克服三维汉字构造中的数据量过大和放大处理的失真问题。

关键词 中国语言文字信息处理(520.6010) 三维汉字构建 分层制作 快速成型 Voronoi 图 B 样条
中图分类号: TP391.43 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)03-0317-05

Constitution of 3D Chinese Character Based Principle of Layer-manufacturing

LI Zhong-yang¹⁾, NI Zhong-tou²⁾

¹⁾(Dept. of Electronic Engineering, Hunan Normal University, Changsha 410081)

²⁾(Huawei Technologies Co., LTD., Shenzhen 51800)

Abstract Usually, the construction of 3D Chinese character mainly applies the sweeping principle—that is, the stroke of 3D Chinese character is generated by variational sections sweeping the center line of its 2D stroke. This method exists defects as follow: difficult expression in abundantly variational strokes of Chinese character and huge data in description of the stroke. For this reason, based on the principle of layer-manufacturing in Rapid Prototyping (RP), that is—any 3D Chinese character can be considered as 2D section accumulated layer by layer, this paper put forward a new method to constitute 3D Chinese character by 2D Chinese character. By applying the theory of Voronoi diagram, the offsets of each layer, which are the skeleton of surface of 3D stroke, are automatically generated by basic 2D stroke contours, which is expressed to double circle link table whose node is coordinate vertex of this contour. By making those contours as skeleton and then interpolating block by block in Bezier-B blend spline surfaces, a 3D stroke of Chinese character is constituted and then a 3D Chinese character is composed by this strokes. In the paper, a actual example of 3D Chinese character is displayed at last, and this new method shows that constitution of 3D Chinese character based on layer-manufacturing can more plentifully express the Chinese stroke, and overcome the problem of huge data capacity and distortion when a 3D Chinese character is magnified.

Keywords Constitution of 3D Chinese font, Layer-Manufacturing, Rapid prototyping, Voronoi diagram, B-spline

0 引言

目前大众媒体里已经出现的三维立体汉字表现形式还不够丰富,因为它们仅是在二维字体的基础上,加上同等的高度所构成,所以其不能表现笔划表

面凹凸不平类似雕刻的视觉效果,为此,人们开展了三维汉字构造方法的研究,这些方法的基本出发点是:将三维字体的每个笔划视作一个以三维空间曲线为轴的立体,它被称为广义圆柱体,并将笔划的中心线作为广义圆柱体的轴线,而变化的截面则沿骨架“扫掠”,以形成立体笔划.这是非常自然的想

基金项目:湖南省教育厅科研项目(0167)

收稿日期:2002-01-17;改回日期:2002-10-08

法,且它与汉字的书写习惯一致,但是实际的艺术汉字,特别是具有破笔和笔峰的汉字,由于其笔划方向的变化远多于高度方向的变化,因此用广义圆柱体构成笔划时,若截面较少,则无法表达笔划方向丰富的变化;若截面太多,则描述三维汉字的数据量庞大;扫掠法存在的另一问题是对汉字进行放大处理时,容易产生失真现象,且笔划的变化不光滑^[1].

为此,本文提出了一种新的三维字体构造方法,即先根据快速成型的分层原理,任意的三维立体汉字都可以看作是由二维薄层沿高度方向逐层堆积而形成,而从平面汉字中实时提取的汉字笔划轮廓线(称为基本轮廓线)则用一组离散的数据点列表示,然后采用 Voronoi 图理论求出基本轮廓线的等距线作为其他层面的轮廓线来构成立体汉字的骨架,而轮廓线之间的侧表面则用样条插值曲面构成,由此来形成立体汉字笔划,它们的组合,即构成三维立体汉字,实践证明,该方法不仅能有效地表达汉字笔划的丰富变化,并能解决汉字放大处理中的失真和数据量的过分增长问题.

1 二维汉字笔划的轮廓线

对于二维汉字,可提取其笔划的边界线作为笔划基本轮廓线,对于笔划变化丰富的处,点列数据密集,

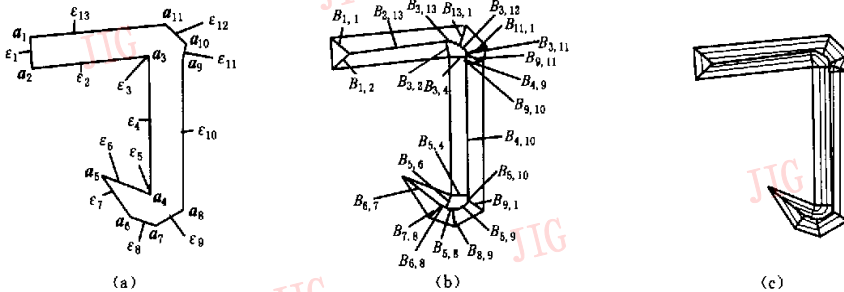


图 1 汉字笔划基本轮廓线的 Voronoi 图和它的等距线

2.1 Voronoi 图的基本概念

定义 1 如果由基本轮廓线一个顶点的两条相邻边构成的内角大于 180°,则称该顶点为优顶点,反之,该顶点称为凸顶点.如图 1(a)中的 a_3 和 a_4 为优顶点, a_1 为凸顶点.

定义 2 基本轮廓线的各直线边和优顶点统称为 Voronoi 图的边界元素,用 ϵ 表示.

用 $D(p, q)$ 来表示两点 p 和 q 之间的距离,而点 p 和一个非空集 X 之间的距离则记为 $D(p, X)$,

否则数据稀疏一些,且与快速成型中的轮廓线表示方式一致,可用双向循环链表存储该点列.每个结点的数据域存放轮廓线的点坐标 (x, y) ;指针域的前趋指针 $prior$ 和后继指针 $next$ 分别存放前后两个结点的地址,并规定按指针 $next$ 指向正方向的结点.

结点数据体表示为

```
struct Node{
    float x, y;
    struct Node * prior;
    struct Node * next;};
```

将上述点列表示为列向量,若将点列用直线连接起来,则笔划就构成多边形区域,假设处理的笔划都是单连通区域,那么立体笔划的其他层面轮廓线则由基本轮廓线产生.

2 其他层面轮廓线的生成

采用笔划基本轮廓线的等距线(offset)来作为其他层面的笔划轮廓线 L_i ,进而提出了基于 Voronoi 图的构造笔划轮廓线 L_i 的方法.由于 Voronoi 图可方便地对汉字笔划基本轮廓线的多边形区域进行分割,因而可方便地计算出它的等距线,并能保证笔划各段等距线正确衔接,现以图 1 所示简化的弯钩笔划为例说明之.

$$D(p, X) = \min D(p, q), \text{ 其中, } q \in X.$$

定义 3 两个边界元素 ϵ_i 和 ϵ_j 的平分线 $B_{i,j}$ 是一条到 ϵ_i 和 ϵ_j 距离相等的轨迹.

定义 4 边界元素 ϵ_i 的 Voronoi 多边形区域 $U(\epsilon_i)$ 是由一些到 ϵ_i 的距离比到多边形区域的其他边界元素 $\epsilon_j(j \neq i)$ 的距离更小的点集构成,即:

$$U(\epsilon_i) = \{q | D(q, \epsilon_i) \leq D(q, \epsilon_j) \quad j \neq i\} \quad (1)$$

定义 5 若基本轮廓线有 n 个边界元素,则该轮廓线的 Voronoi 图定义为 n 个边界元素的

Voronoi 多边形区域 $U(\epsilon_i)$ 的并集,并记为 $V(n)$,即

$$V(n) = \{U(\epsilon_i) | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

定义 6 一个边界元素 ϵ 的影响域记为 Ψ ,它是由一些到 E 的距离比到其他线段 \tilde{E} 更近的点集构成,即

$$\Psi = \{p | D(p, q) < D(p, r), q \in E \text{ 且 } r \in \tilde{E}\} \quad (3)$$

对于一条从起点 s 到终点 e 的直线段,它的影响域为,以过两端点的两条法线为边界,指向直线段左边的带状区域(见图 2(a));对于优顶点 a ,其影响区为由过该点垂直其两条边的两条射线所构成的角形区域(图 2(b)).

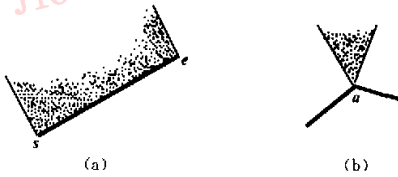


图 2 直线段和优顶点的影响域

2.2 基本笔划轮廓线区域的 Voronoi 图划分

基本轮廓线只有优顶点和直线段两种类型的边界元素,它们的平分线分析如下:

(1) 边界元素为两根直线段

其平分线为落在两个边界元素的公共影响域内的直线段,如图 3(a)中的 $p_0 p_1$.

(2) 边界元素一个为优顶点 a ,另一个为直线段

此时平分线即为以直线段为准线,以优顶点为焦点的抛物线段(见图 3(b)).

(3) 边界元素为两个优顶点

其平分线为公共影响域内,过两优顶点连线的垂直平分线.

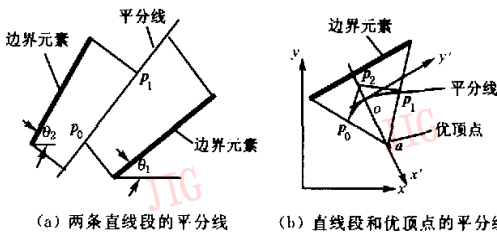


图 3 边界元素的平分线分析

将汉字笔划基本轮廓线的基本元素也用双向循环链表表示,并按一定顺序求出基本元素 ϵ 的初始平分线,它们被表示为射线,若以图 1(a)所示的基本笔划轮廓线为例,则它的 Voronoi 图的生成与存储表示可体现为二叉树的构造过程.若从 ϵ_1 出发,按前趋和后继指针,先取出 ϵ_1 和 ϵ_2 以及 ϵ_1 和 ϵ_{13} 两条初始平分

线,在确定它们的交点,即形成两条线段 $B_{1,2}$ 和 $B_{1,13}$ 后,并构成树的两个结点后,再以它们的交点为起点,通过求 ϵ_2 和 ϵ_{13} 两边界元素的公共影响域的平分线来构成线段 $B_{2,13}$,该线段是 $B_{1,2}$ 和 $B_{1,13}$ 的父结点,再通过确定 ϵ_2 和它的后继结点 ϵ_3 的初始平分线的端点来形成线段 $B_{3,2}$,然后将其作为新的子结点来求出 ϵ_3 和 ϵ_{13} 两边界元素的公共影响域的平分线,该平分线是一段抛物线 $B_{3,13}$,最后将其作为 $B_{3,2}$ 和 $B_{2,13}$ 的父结点,……直至所有初始平分线被合并完毕为止.

2.3 笔划轮廓线的等距线的生成

多边形区域的 Voronoi 图生成后,再按给定的路径偏置距离 t 来生成多边形轮廓的等距线,对于优顶点,它的等距线是以顶点为圆心,以 t 为半径的圆弧;对于直线,它的等距线是与它距离等于 t 的平行线,以图 1(a)的弯钩笔划为例,给定多边形的偏置距离为 t ,其生成的笔划轮廓线等距线以细线表示(见图 1(c)).它们也是一些多边形.求这些等距线的方法是:先从一条棱边开始,按给定的路径偏置距离 t ,给出该棱边的平行线;然后求该棱边与两条 Voronoi 边的交点,再将这些交点连接成双向循环链表,当回到起始的 Voronoi 边时,则多边形轮廓的等距线生成完毕;最后增大偏置距离 t ,开始生成下一条等距线路径.

当偏置距离 t 较大时,复杂的多边形轮廓的等距线可能为多个独立的环,这种情况一般出现在草书的笔划中,因为草书的笔划变化无常,但对于隶书、宋体等字体,它们的笔划“规范”,即其他层面的笔划轮廓线与基本轮廓线“相似”.

Voronoi 图的数据结构及其等距线生成的具体算法见文献[2]、[3]、[4].

3 立体汉字笔划表面的 B-样条曲面插值

作出汉字笔划等距线后,把它们分别置于不同的高度,并由笔划基本轮廓线构成底面,再用 Bezier-B 混合样条曲面构成立体笔划的侧面,其笔划的最上层为由具有最大偏置距离的等距线构成的小平面.

基本层的轮廓线点列: $L_0 = [v_1^{(0)}, v_2^{(0)}, \dots, v_i^{(0)}, \dots, v_n^{(0)}]^T$ 首尾相连构成一个多边形,若一个顶点 v 是优顶点,则它的等距线为一段圆弧,此时应将它处理为样条插值的重结点,并与其他层面的轮廓线点列一一对应:

$$L_j = [v_1^{(j)}, v_2^{(j)}, \dots, v_i^{(j)}, \dots, v_n^{(j)}]^T (j = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

其中,上标表示层号,下标表示同一层面的点列序号,不同层面的点列一一对应,即下标相同的点构成配对.某一层面轮廓线的 n 个型值点列为

$$v_1^{(j)}, v_2^{(j)}, \dots, v_i^{(j)}, \dots, v_n^{(j)}$$

从中每次取相邻的 4 个顶点,就可以构造出一段三次 B 样条曲线,若将立体笔划分成 4 个基本层,则它们的第 i 段 B 样条曲线表示为

$$\begin{bmatrix} c_i^{(0)}(u) \\ c_i^{(1)}(u) \\ c_i^{(2)}(u) \\ c_i^{(3)}(u) \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} p_{i-1}^{(0)} & p_i^{(0)} & p_{i-1}^{(0)} & p_{i+2}^{(0)} \\ p_{i-1}^{(1)} & p_i^{(1)} & p_{i-1}^{(1)} & p_{i+2}^{(1)} \\ p_{i-1}^{(2)} & p_i^{(2)} & p_{i+1}^{(2)} & p_{i+2}^{(2)} \\ p_{i-1}^{(3)} & p_i^{(3)} & p_{i+1}^{(3)} & p_{i+2}^{(3)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 0 & 4 \\ -3 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^3 \\ u^2 \\ u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $p_{i-1}^{(j)}, p_i^{(j)}, p_{i+1}^{(j)}, p_{i+2}^{(j)}$ 为第 j 层 B 样条曲线的控制顶点,它们由如下方法反求

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & \dots & \dots & 1 \\ 1 & 4 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^{(j)} \\ p_{i+1}^{(j)} \\ \dots \\ p_{i+n-1}^{(j)} \\ p_n^{(j)} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} v_1^{(j)} \\ v_2^{(j)} \\ \dots \\ v_{i+n-1}^{(j)} \\ v_n^{(j)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

该线性方程可由追赶法解得,为保证曲线首尾

$$S_i(u, \omega) = \begin{bmatrix} \omega^3 \\ \omega^2 \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -0.75 & 2.25 & -2.25 & 0.75 \\ 1.5 & -3.75 & 3 & -0.75 \\ -0.916 & 1.5 & -0.75 & 0.166 \\ 0.166 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-1}^{(0)} & p_i^{(0)} & p_{i+1}^{(0)} & p_{i+2}^{(0)} \\ p_{i-1}^{(1)} & p_i^{(1)} & p_{i+1}^{(1)} & p_{i+2}^{(1)} \\ p_{i-1}^{(2)} & p_i^{(2)} & p_{i+1}^{(2)} & p_{i+2}^{(2)} \\ p_{i-1}^{(3)} & p_i^{(3)} & p_{i+1}^{(3)} & p_{i+2}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 0 & 4 \\ -3 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^3 \\ u^2 \\ u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

4 立体笔划的合成

在生成立体笔划后,再将它们组合成立体汉字,若有两个用式(9)表达的三维笔划,且它们 4 个层面的 B 样条曲线 $c_i^{(j)}(u) (j=0, 1, 2, 3)$ 的型值点的对应高度相等,则不难证明,与相同的 ω 参数取值所对应的两个笔划的分层面都处于同一平面上,为此,本文基于分层的思想,构造了一个简单的笔划求交算法,笔划求交时,取 $\omega=0$,先得两个共面的平面笔

划,并使曲线上结点序号与多边形序号相对应,须使: $p_0^{(j)} = p_n^{(j)}, p_{n+1}^{(j)} = p_1^{(j)}$,由此 $n+2$ 个控制点就拼合成了 n 条 B 样条曲线 $c_i^{(j)}(u) (i=1, 2, \dots, n)$,它的起点为 $v_i^{(j)}(u=0)$,终点为 $v_{i+1}^{(j)}(u=1)$ 。

在 $j=0, 1, 2, 3$ 的 4 个层面的 B 样条曲线 $c_i^{(j)}(u)$ 中,对于相同的 u ,可将每一层的 B 样条曲线 $c_i^{(0)}(u), c_i^{(1)}(u), c_i^{(2)}(u), c_i^{(3)}(u)$ 视为型值点,当其沿 ω 向滑动时,即构成一条 Bezier 曲线,当 ω 值由 0 到 1 连续变化时,在笔划侧面就形成了 n 块 Bezier-B 混合样条曲面,可表示为

$$S_i(u, \omega) = \begin{bmatrix} \omega^3 \\ \omega^2 \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_i^{(0)} \\ Q_i^{(1)} \\ Q_i^{(2)} \\ Q_i^{(3)} \end{bmatrix} = \Omega M Q \quad (7)$$

控制点 $Q_i^{(j)} (j=0, 1, 2, 3)$ 可由条件 $S_i(u, 0) = c_i^{(0)}(u), S_i(u, 1/3) = c_i^{(1)}(u), S_i(u, 2/3) = c_i^{(2)}(u), S_i(u, 1) = c_i^{(3)}(u)$ 来反求:

$$\begin{bmatrix} Q_i^{(0)} \\ Q_i^{(1)} \\ Q_i^{(2)} \\ Q_i^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.8333 & 3 & -1.5 & 0.333 \\ 0.333 & -1.5 & 3 & -0.8333 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_i^{(0)}(u) \\ c_i^{(1)}(u) \\ c_i^{(2)}(u) \\ c_i^{(3)}(u) \end{bmatrix} \quad (8)$$

最终得到的一块样条曲面如下:

$$S_i(u, \omega) = \begin{bmatrix} \omega^3 \\ \omega^2 \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -0.75 & 2.25 & -2.25 & 0.75 \\ 1.5 & -3.75 & 3 & -0.75 \\ -0.916 & 1.5 & -0.75 & 0.166 \\ 0.166 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-1}^{(0)} & p_i^{(0)} & p_{i+1}^{(0)} & p_{i+2}^{(0)} \\ p_{i-1}^{(1)} & p_i^{(1)} & p_{i+1}^{(1)} & p_{i+2}^{(1)} \\ p_{i-1}^{(2)} & p_i^{(2)} & p_{i+1}^{(2)} & p_{i+2}^{(2)} \\ p_{i-1}^{(3)} & p_i^{(3)} & p_{i+1}^{(3)} & p_{i+2}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 0 & 4 \\ -3 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^3 \\ u^2 \\ u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

划,再求出它们的交点 $a_1^{(0)}, a_2^{(0)}, a_3^{(0)}, a_4^{(0)}$ (上标为层面号,下标为交点号,对于完全交叉笔划,其交点数为 4;对于一般交叉笔划,其交点数为 2);然后取 $\omega = \omega + \Delta\omega, \Delta\omega$ 为视精度给定的增量值,再求出一组新的交点 $a_1^{(j)}, a_2^{(j)}, a_3^{(j)}, a_4^{(j)} \dots$ 直至两个平面笔划不再相交为止;最后将每一组交点的对应点用折线连接起来(例如 $a_1^{(0)} \rightarrow a_1^{(1)} \rightarrow \dots \rightarrow a_1^{(j)} \rightarrow \dots$),即构成了两立体笔划的交线,限于篇幅,详细算法不再赘述,图 4 是用混合样条曲面插值构成立体笔划后,组合而成的立体汉字效果图。

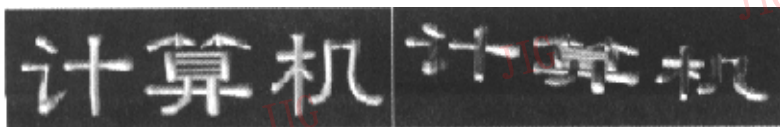


图 4 三维立体汉字效果图

与扫描法比较,分层法虽增加了笔划平面上的型值点,但减少了笔划横截面的采样点,对于扫描法,若每个笔划平均包含6个截面,每个截面的轮廓线上有24个采样点,则三维汉字包含的顶点数据量为 $6 \times 24 \times 3 = 432$ 个实型数据;而对于分层法,若一个平面笔划平均用15个型值点,则总共只需要 $15 \times 4 \times 3 = 180$ 个实型数据,且用这15个型值点描述的平面笔划比用6个截面描述的笔划要丰富得多。

5 结束语

由于目前立体汉字在高度方向尚没有制作标准,因此本文是基于快速成型的分层原理来构造立体汉字的笔划,即先提取平面汉字的笔划轮廓线点列,并通过对它进行数学变换来生成其他层面的轮廓线,然后将这些点列用 n 块 Bezier-B 混合样条曲面进行拟合来生成立体笔划,再基于分层的思想,求出立体笔划之间的交线,进而构建出三维立体汉字。与扫描法生成立体汉字的方法比较,该方法的优点是:

(1) 由于没有高度方向的限制,因此可以用相对较少的数据量来存储立体汉字,并且该方法可以描述变化更为丰富的笔划;

(2) 对于立体汉字的放大处理,由于是采用样条曲面来粘贴立体骨架,并且笔划方向的点列较多,因而在立体汉字放大时,字体表面转折处不会发生不光滑现象;

(3) 对于笔划有自相交等变化的笔划,由于可用

分层的方法求出每一层面的交点来构造出笔划的自相交交线,因而可方便地构造出立体笔划。

可以认为,基于分层法的构建立体汉字方法更为合理可行。

参考文献

- 1 泥宗涛. VR 技术中三维立体汉字、体绘制算法及碰撞检测的研究[D]. 广州:华南理工大学博士学位论文,2000. 6.
- 2 KimDeok-Soo. Polygon offsetting using a voronoi diagram and two stacks[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(14):1069~1076.
- 3 Martin Held. Voronoi diagrams and offset curves of curvilinear polygons[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(4):287~300.
- 4 李仲阳,谢存德. CAD 模型截面的 Voronoi 图的生成与分层面的等距线填充[J]. 计算机工程与应用,2002,38(2):86~88.
- 5 孙家广. 计算机图形学(第3版)[M]. 北京:清华大学出版社,1998.

李仲阳 1963年生,2000年获华南理工大学博士学位,现为湖南师范大学电子与信息工程系教授。主要从事CAD、快速成型与计算机图形图像处理等方面的教学与科研工作。发表论文20余篇。



泥宗涛 1967年生,2000年获华南理工大学博士学位,工程师,现工作于深圳华为技术有限公司。主要从事虚拟现实与计算机图形图像处理等方面的研究。

