

可控的三维 Morphing^{*}

方向, 鲍虎军, 彭群生

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

E-mail: {xfang, bao, peng}@cad.zju.edu.cn

http://www.zju.edu.cn

摘要: 提出了一种基于距离场插值的三维 Morphing 算法。该方法通过解析距离场来实现三维 Morphing, 使过渡形体的光滑性不依赖于原模型的高散剖分精度。同时, 给出了基于约束点对和变形控制体的交互形状过渡算法, 用户可由此直观而方便地对变形过程实施有效的控制。多个变形实例证明, 该算法能够方便地实现两个任意定向流形模型间的可控三维 Morphing。

关键词: 三维 Morphing; 距离场; 隐式曲面; 计算机动画

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

在计算机图形学领域, Morphing 是指将一个物体模型光滑过渡为另一个不同模型的技术。由于该技术能够产生奇特的视觉效果, 已被广泛应用于三维造型及计算机动画系统之中。

Morphing 技术可分为二维和三维两种。二维 Morphing 通常是指将一幅图像逐渐变形为另一幅。二维 Morphing 一般用一组分别定义在两幅图像中的特征点和特征线来建立两幅图像之间像素的对应关系, 中间的过渡图像通过插值对应像素的颜色和位置得到。所以, 二维 Morphing 技术的核心在于如何建立两幅图像间像素的相互映射关系。比较成功的算法有基于网格的变形算法^[1]和域变形算法^[2]。由于二维 Morphing 在计算过渡图像时未考虑三维几何信息, 其过渡图像往往不真实。基于视点的变形算法^[3]通过计算摄像机变换能够获得较好的二维 Morphing 效果, 但这一问题的根本解决要靠三维 Morphing 技术。与二维 Morphing 相比, 三维 Morphing 很难实现两个不同拓扑结构模型之间的形状过渡。国内外的研究者已提出了许多三维 Morphing 算法^[4~12]。其中 Hong 等人^[4]提出了将两个多边形模型中形心最近的面片进行匹配的算法。Kent 等人^[5]提出了针对亏格为零的多边形模型的 Morphing 算法, 通过将原模型及目标模型都投影到一个球面上来建立两个模型之间顶点的对应关系。该算法要求原模型及目标模型必须是星形的, 因此不能处理一般形状的模式。鲍虎军等人^[6]提出了一种基于多边形局部参数化及重采样技术的二维 Morphing 算法, 此算法很好地解决了两个拓扑同构的模型间的变形问题。Lee 等人^[7]则采用多边形模型的多分辨率表示自动实现模型表面的分片及局部参数化。Kaul 等人^[8]采用 Minkovski 之和的方法来实现两多面体间的变形。Galim 等人^[9]用 Metaball 技术和 Minkovski 之和的方法实现三维变形。Payne 等人^[10]用一系列体素来逼近原始模型, 并通过插值相应的体素来实现变形。Cohen 等人^[11]用离散距离场的方式来逼近原始模型, 变形过程则通过插值两距离场来实现。Turk 等人^[12]则将变形问题

^{*} 收稿日期: 1999-12-17; 修改日期: 2000-03-13

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(69925204); 浙江省自然科学基金资助项目(697011); 创新研究群体科学基金资助项目(60021201)

作者简介: 方向(1973-), 男, 山东临沂人, 博士生, 主要研究领域为计算机辅助设计, 计算机图形学; 鲍虎军(1966-), 男, 浙江温州人, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为计算机动画, 真实感图形, 虚拟现实; 彭群生(1947-), 男, 湖南新化人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为真实感图形, 虚拟现实, 计算机辅助设计, 科学计算可视化。

看做是包含三维坐标及时间变量的高维插值问题,并用变分插值的方法实现了不同拓扑结构模型之间的平滑变形,虽然该算法是一种完全自动的变形方法,但反而使用户较难实现对变形过程的有效控制。

本文提出了一种基于距离场插值的三维 Morphing 算法.与 Cohen^[1]算法不同的是,该方法给出了距离场的解析表示,使得过渡形体的光滑性不受原模型剖分精度的影响.而且此方法允许用户通过交互指定两个原始模型上的对应点来实现对变形过程的有效控制.同时,通过引入变形控制体的方法,丰富了用户对变形过程的控制手段。

1 基于距离场的三维 Morphing 技术

三维 Morphing 技术的实现与模型的具体描述形式密切相关.目前,几何模型一般表示为 NURBS 曲面或多边形网格的形式.对任意两个模型,其拓扑结构往往各不相同.传统的三维 Morphing 算法试图直接建立起给定两个模型之间顶点的对应关系,但这类算法至今还不能解决不同拓扑模型(如球和环)间的形状过渡的问题。

若模型能够以隐函数的形式表示,不妨记作 $f(x, y, z) = 0$,则两模型间的 Morphing 可以通过简单的线性插值来实现,即 $g(x, y, z, t) = (1-t)f_0 + tf_1, t \in [0, 1]$,其中 f_0 和 f_1 分别表示原模型和目标模型.这里, $g(x, y, z, t) = 0$ 对应于变形过程中某一时刻的模型.因而,三维 Morphing 问题可转化为对任意模型的隐式化问题。

对任一定向二维流形表面 S ,可由它建立起一个距离场来实现其隐式化.若定义空间中任一点 X 到 S 的有符号距离值为点 X 到 S 的欧氏距离值,且当点 X 在 S 内部时距离符号取负,反之取正(也可采用相反的符号定义方式),则由 S 唯一地定义了一个距离场,不妨记为 $F_S(X) = d, d \in R$.此距离场的等值面 $F_S(X) = 0$ 即为曲面 S .由于距离场 F_S 的构造本质上是一个超限插值问题,因而对于任意曲面 S ,并不能保证存在一个严格的解析解.本文第 2 节将给出建立上述距离场的一个近似方法.对于模型 A, B ,不妨假设其近似距离场为 $F_{S_A}(X)$ 和 $F_{S_B}(X)$,则从模型 A 到模型 B 的变形过程可简单描述为

$$M(A, B) = \alpha(t)F_{S_A}(X) + \beta(t)F_{S_B}(X) = 0. \quad (1)$$

式(1)中等于“0”是指对每个过渡形体表面都是通过抽取该时刻距离场的零等值面而得. $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 是时间 t 的函数,满足 $\alpha(t), \beta(t) \in [0, 1], \alpha(t) + \beta(t) = 1$.用户可以通过选择适当的函数 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 来获得预期的 Morphing 效果。

不难发现,仅通过调整函数 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 来控制变形效果的办法十分有限,用户很难精确地控制 Morphing 过程.如要求模型 A 上的一点经变形后成为模型 B 上指定的某一点.为了方便用户对变形过程的控制,算法应当允许用户交互定义一系列对应点,若设 $P_{ij}, i=0, 1, j=1, \dots, n$ 为用户定义的约束点对,其中 P_{0j} 和 P_{1j} 分别为模型 A 和 B 上的点,则可分别建立变换 $W_0(X, t)$ 和 $W_1(X, t)$,满足:

$$\begin{cases} W_0(P_{0j}, 0) = P_{0j} \\ W_0(P_{0j}, 1) = P_{1j} \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} W_1(P_{1j}, 0) = P_{0j} \\ W_1(P_{1j}, 1) = P_{1j} \end{cases}, j=1, \dots, n. \quad (2)$$

在上述变换中我们仅保证了约束点的对应关系,但非约束点也将随约束点而变化.注意,式(2)中已将时间 t 规范到 $[0, 1]$ 区间上,此时,变形过程可重新表示为

$$M(A, B) = \alpha(t)F_{W_0(S_A, t)}(X) + \beta(t)F_{W_1(S_B, t)}(X) = 0. \quad (3)$$

式(3)中 $F_{W_0(S_A,t)}$ 和 $F_{W_1(S_B,t)}(X)$ 分别表示定义在经变换后模型的距离场函数,它同时是空间三维坐标和时间 t 的函数. 本文第 3 节将给出建立适当 W 变换的方法及如何应用到变形过程中.

2 任意模型的近似距离场

我们知道,如果能够将任意模型隐式化,则不同模型间的变形问题将迎刃而解. 一般地,曲面隐式化同样与其原始定义形式有关,对有些模型如参数曲面模型,其直接隐式化是有条件的;而对多面体模型,因为其表面通常只有 C^0 连续,所以不存在连续可导的隐函数表示. 因此,对于一般模型不存在一个统一的隐式化方法. 但对变形应用而言,往往并不需要隐式化后的模型表面与原模型完全一致,所以,近似的距离场插值方法能够较好地满足变形的隐式化要求.

对于任意定向二维流形,都惟一地定义了一个空间距离场. 不妨假设给定模型为多边形网格,其中每个顶点对应的距离场值为“0”. 对于星形模型,我们可取其中心点并赋一任意负值作为该点的近似距离场值;而对一般模型,可在每一顶点处沿其法向向外延伸一定距离, h 得到一个新点,并将距离值 h 作为该点的距离场值. 这样,近似距离场的求解就变成了一个典型的散乱数据插值问题. 通过这些插值点的函数可能有无穷多个,但我们希望插值的距离场等值面是光顺的. 为此,我们考虑如下的能量泛函:

$$E = \int_{\Omega} F_{xx}^2 + 2F_{xy}^2 + F_{yy}^2 dx dy, \quad (4)$$

使能量 E 达到最小值的函数 F 即为所求. 这是一个典型的条件极值问题,文献[13]研究了此类泛函问题的求解,并给出了其通解:

$$F(X) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Phi(X - C_i) + L(X). \quad (5)$$

式(5)中 $X = (x, y, z)$ 为一个三维矢量, C_i 为型值点, $\Phi(X - C_i)$ 为一个 radial 基函数,可取 $\Phi(X) = |X|^3$, $L(X)$ 为一个线性项, α_i 为实系数. 这样,距离场近似插值问题就变为求解式(5)中的组合系数的问题. 这是一个典型的线性方程组求解问题,鉴于该方程组的系数矩阵是对称半正定的,所以存在惟一解. 有许多线性方程组的数值解法可用来求解此方程组,本文用 LU 分解法求解.

在由多边形网格定义的距离场中,原多边形网格面恰好对应于零等值面,图 1 为一个多边形网格及其对应的距离场等值面,图中的线框为原多边形模型,绘制曲面为对应的阈值为 0 的距离场等值面. 因为在距离场插值过程中采用了能量函数的光顺条件,所以插值的距离曲面将圆锥的尖角和棱边都磨光了. 对于由参数曲面定义模型,可用离散采样的方法得到其距离场的近似解.

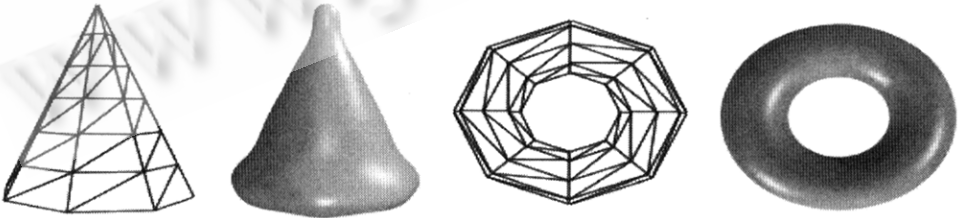


Fig. 1 The iso-surface of distance field defined on polygon models

图 1 多边形模型的距离场等值面

3 约束点控制的 Morphing

如果直接对两个模型的距离场进行混合以获得中间的过渡形状,有时会产生一些不自然的过渡形状,如图 2 所示,在某些情况下甚至产生怪异的拓扑结构.建立变形约束点的目的就是要有效地控制变形过程.它使得用户可以通过指定一些特征点来控制变形过程.

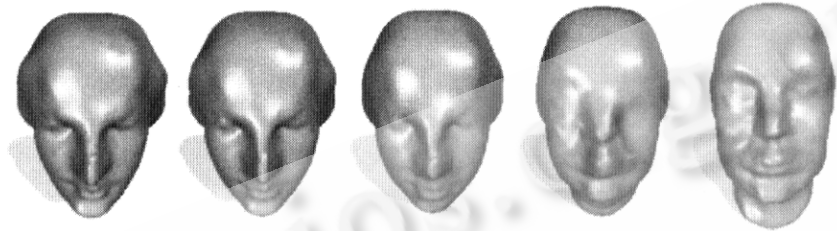


Fig. 2 Morphing without constraint points

图 2 无约束点的 Morphing

约束点由一系列分布在原模型和目标模型上的点对组成,在变形过程中,这些约束点应当由原模型逐渐变化到目标模型上,而且在变形的中间某一时刻,约束点在过渡形体上都存在一个对应点.所以通过定义约束点对,用户能够精确地控制变形过程.

设给定的约束点对为 $P_{ij}, i=0, 1, j=1, \dots, n$. 当 $i=0$ 时对应于原模型上的点,当 $i=1$ 时对应于目标模型上的点.我们的目标就是要构造满足式(2)的变换函数 W . 虽然形式上 W 是一个 $R^3 \rightarrow R^3$ 的映射,实际上可将它看做是关于 3 个坐标分量的 3 个相互独立的映射函数.所以它可分解为 3 个散乱数据的插值问题,同样可用上述散乱数据插值的方法来解决.

我们注意到,式(3)中的距离场函数是依赖于其具体的定义模型的,因此,若将变换 W 直接作用在模型 A 和 B 上,则计算中间每个过渡形状时都需要重新构造变换后模型的距离场函数.通常情况下,用户定义的控制点数远小于模型的顶点数,因此,构造变换 W 的计算量远小于构造距离场的计算量.为了提高算法效率,我们可认为变换 W 作用在整个距离场上,即距离场函数可表示为 $F_S(W(X_0, t))$, 式中 X_0 表示初始时刻距离场空间上的点.因此,在计算中间某一时刻空间上一点 X 的距离场值时,可将该点分别用 W_0 和 W_1 的逆变换变到其初始距离场中的对应位置再计算其场值,这样可避免每次重新构造距离场函数.直接计算变换 W_0 和 W_1 的逆函数是困难的,本文采用构造 W 变换的逆过程来建立其逆变换的一种近似表示.具体方法是首先分别计算出约束点的当前位置 $P'_{0j} = W_0(P_{0j}, t), P'_{1j} = W_1(P_{1j}, t)$. 然后,分别对点对 P'_{0j}, P_{0j} 和 P'_{1j}, P_{1j} 应用建立正向变换的方法建立其逆向变换 W'_{0j} 和 W'_{1j} . 这样,新的 Morphing 过程可表示为

$$M(A, B) = \alpha(t)F_{S_A}(W'_{0j}(X)) + \beta(t)F_{S_B}(W'_{1j}(X)) = 0. \quad (6)$$

比较图 2 和图 3 可以发现,没有约束和加入约束点的 Morphing 过程是不同的.图 3 中主要对两个人头模型的特征点建立约束,如鼻尖、眼睛、嘴角等处.从图中可以看出,由于加入了对特征点的变形控制,使得过渡形状在每一步都保持人脸的特征.图 4 为用上述 Morphing 技术模拟水滴的变化过程,且此形状过渡是在两个拓扑不同构的模型之间实现的.其中图 4(a)显示了交互定义的特征点对.图 5 的 Morphing 过程通过约束点对建立了兔子与猪的模型之间耳朵、尾巴、脚等处的对应关系,使变形过程更加自然.注意,图中显示了 Morphing 过程中模型阴影的自然变化,这是二维 Morphing 算法很难实现的.

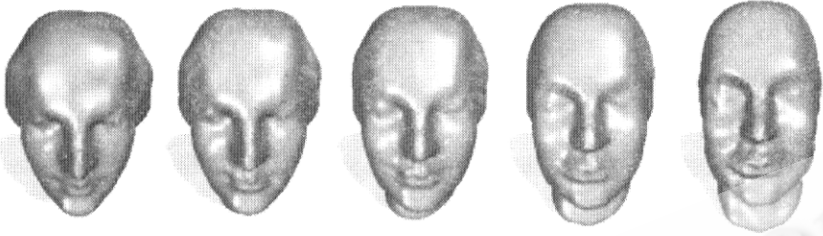


Fig. 3 Morphing with some feature point constraints

图 3 含特征点约束的 Morphing

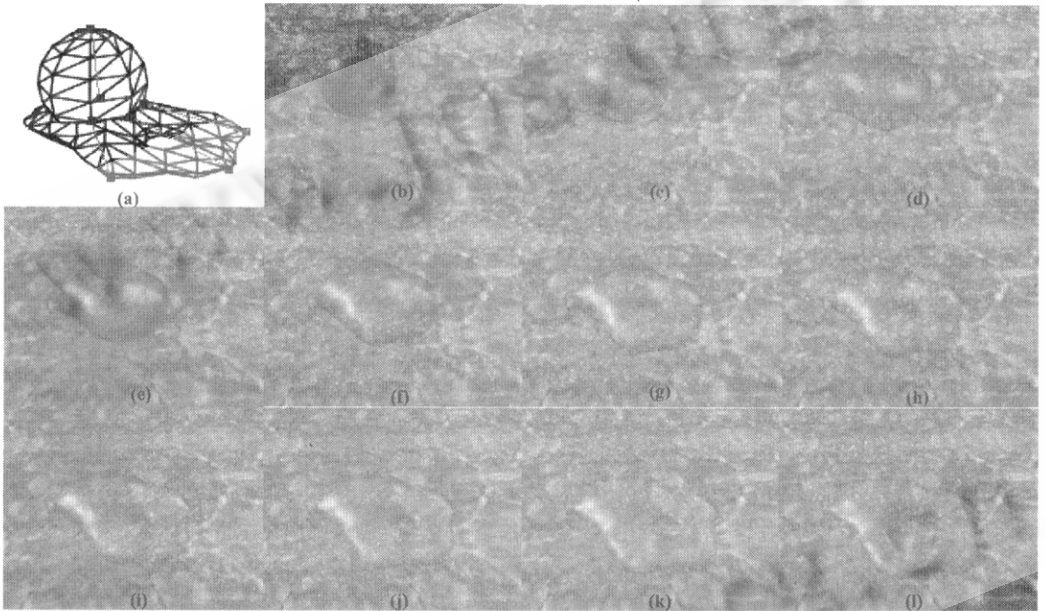


Fig. 4 The morphing between two different topology models, (a) shows the morphing constraint points interactively defined, (b)~(l) are the transformation shapes

图 4 拓扑不同的两模型间 Morphing, (a)为交互定义的变形约束点对, (b)~(l)为过渡形状

当原始模型与目标模型的位置、朝向及比例偏差较大时,可通过引入一个随时间逐渐变化的位移、旋转和比例变换使得变形过程自然.因为这不是本文的重点,在此不再详述.

4 变形控制体

通常在进行 Morphing 时仅指定了原始模型和目标模型,所以中间的过渡形体往往是由这两个模型通过一个线性插值得到. Rossignac 和 Kaul^[14] 希望将 Morphing 过程变成一个非线性过程,因此,他们提出用中间形体来控制变形过程的方法.该方法通过 Minkovski 之和建立起多个多边形模型之间的点匹配,使得用户可以通过控制形体来影响变形过程,但算法非常耗时($O(n^4)$). Turk^[12] 等人用高维插值的方式也实现了变形控制体的思想,但 Turk 的方法每增加一个变形控制体就要将变分插值函数增加一维,不仅使计算量明显提高,而且它将原来变形过程是以时间 t 为参数的一条曲线扩展为一张曲面甚至一个高维的体,反而使用户难以确定一条适当的变形路径.

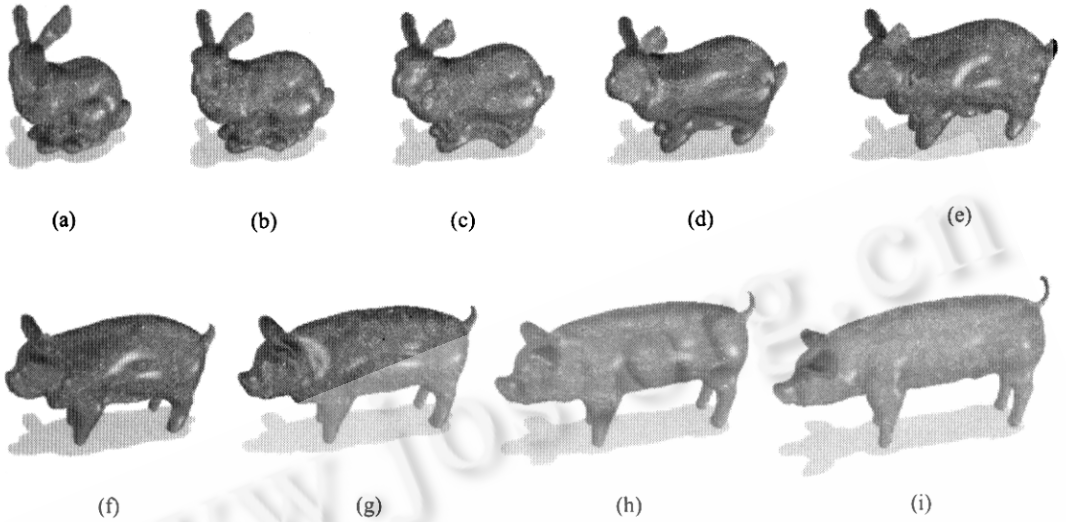


Fig. 5 A morphing procedure from a bunny model to a pig model, which is controlled by the feature points
图 5 用特征点控制的从兔子模型到猪模型的 Morphing 过程

对基于距离场的 Morphing, 可以很方便地实现变形控制体. 我们若将以时间 t 为参数的变形过程看成是一条 Bézier 曲线, 则变形的原始模型和目标模型的距离场是此 Bézier 曲线的控制多边形的首末两个顶点, 而变形控制体的距离场可看做是此曲线控制多边形的中间顶点. 根据 Bézier 曲线的性质, 此曲线插值首末两控制顶点, 且近似拟合其他各控制顶点, 即在首末端点处的距离场恰好分别为原始模型和目标模型的距离场, 中间过程的距离场将受变形控制体的影响而近似于较近的控制体的距离场, 这刚好与引入变形控制体的目的相吻合. 为了更有效地控制变形控制体的作用, 可对每个变形控制体赋予一个权系数来控制其影响范围, 则变形过程可用有理 Bézier 曲线的形式表示为

$$M(A, B) = \frac{\omega_0 B_{n+1}^0(t) F_{S_A}(W'_{ot}(X)) + \omega_{n+1} B_{n+1}^{n+1}(t) F_{S_B}(W'_{it}(X)) + \sum_{i=1}^n \omega_i B_{n+1}^i(t) F_{S_i}(X)}{\sum_{i=0}^{n+1} \omega_i B_{n+1}^i(t)} = 0, \tag{7}$$

$$B_{n+1}^i(t) = C_{n+1}^i t^i (1-t)^{n-i+1}, \quad t \in [0, 1], \quad \omega_i > 0.$$

其中 $B_{n+1}^i(t)$ 为 Bernstein 基函数, ω_i 为权系数, n 等于变形控制体的数量. 图 6 为用变形控制体生

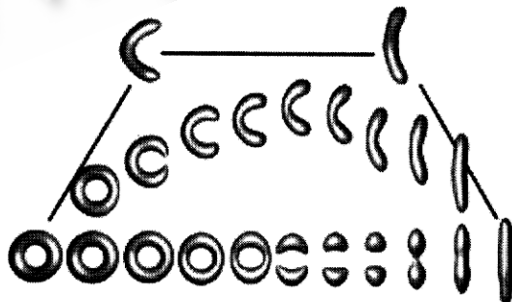


Fig. 6 A morphing procedure with influence shapes
图 6 含控制模型的 Morphing 过程

成的变形过程,其中对应控制多边形的角点处分别为初始模型、目标模型及变形控制模型,以曲线方式摆放的为有控制多边形的 Morphing 过程,水平摆放的为不含控制多边形的 Morphing 过程. 容易发现,变形控制体的引入有效地控制了变形的进程.

5 结 论

本文提出了一种基于距离场插值的三维 Morphing 算法,并在我们的原距离场造型系统的基础上实现了本算法,文中的所有例子都是用上述原型系统生成的. 与其他三维变形算法相比,本文提出的算法主要有以下几个特点:

- (1) 能够生成任意两个定向二维流形间的变形,不受模型拓扑结构和几何复杂性的限制;
- (2) 用约束点对和变形控制体,用户能够方便、直观地控制变形过程;
- (3) 变形过渡形体的精度不依赖于原模型的离散剖分精度;
- (4) 变形过程光滑,无突变.

与直接点映射的三维 Morphing 算法相比,基于距离场的变形算法的计算量较大,如何加速此算法是今后研究的重点. 另外一件很有意义的工作就是实现变形过程中两个模型纹理坐标的自动变换,以实现模型纹理的光滑过渡.

采用插值距离场技术,可以通过离散采样逼近任意方法描述的模型,如 NURBS 精确模型或离散的多面体模型. 但由于重建的距离场等值面只是原模型表面的逼近结果,所以此方法主要适用于计算机动画等主要注重视觉效果而对模型精度无严格要求的领域.

References:

- [1] Wolberg, W. Digital Image Warping. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1990.
- [2] Beier, T., Neely, S. Feature-Based image morphing. *Computer Graphics*, 1992,26(2):35~42.
- [3] Seitz, S.M., Dyer, C.R. View morphing. *Computer Graphics*, 1996,30(3):21~30.
- [4] Hong, T., Thalmann, N.M., Thalmann, D. A general algorithm for 3-D shape interpolation in a facet-based representation. In: Crow, F.C., ed. *Proceedings of the Graphics Interface'88*. Edmonton: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988. 229~235.
- [5] Kent, J.R., Carlson, W.E., Parent, R.E. Shape transition for polyhedral objects. *Computer Graphics*, 1992,26(2):47~54.
- [6] Bao, Hu-jun, Peng, Qun-sheng. Interactive 3D morphing. In: Göbel, M., Nunes Ferreira F., eds. *Proceedings of the Eurographics'98*. Lisbon Portugal; Blackwell Ltd., 1998. 23~30.
- [7] Lee, A.W.F., Dobkin, D., Sweldens, W. Multiresolution mesh morphing. In: Rockwood, A., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'99 Conference*. Los Angeles; ACM Press, 1999. 343~350.
- [8] Kaul, A., Rossignac, J. Solid-Interpolating deformations; construction and animation of PIPs. In: Howard, T., Brown, J.R., eds. *Proceedings of the Eurographics'91*. Vienna; Blackwell Ltd., 1991. 493~506.
- [9] Galin, E., Akkouche, S. Blob metamorphosis based on Minkovski sums. In: Rossignac, J., Sillion, F., eds. *Proceedings of the Eurographics'96*. Poitiers; Blackwell Ltd., 1996. 143~154.
- [10] Payne, B., Toga, A. Distance field manipulation of surface models. *IEEE Transactions on Computer Graphics & Applications*, 1992,12(1):65~71.
- [11] Daniel, Cohen-Or, Levin, D., Solomovici, A. Three-Dimensional distance field metamorphosis. *ACM Transactions on Graphics*, 1998,17(2):116~141.
- [12] Greg, T., O'Brien, J.F. Shape transformation using variational implicit functions. In: Rockwood, A., ed. *Proceedings of*

- the SIGGRAPH'99 Conference. Los Angeles: ACM Press, 1999. 335~342.
- [13] Duchon, Jean. Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in sobolev spaces. In: Dolb, A., Eckmann, B., eds. Constructive Theory of Functions of Several Variables. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 1977. 85~100.
- [14] Rossignac, Jarek, Anil Kaul. AGRELS and BIPs: metamorphosis as a Bézier curve in the space of polyhedra. In: Dæhlen. M., Kjeldahl, L., eds. Proceedings of the Eurographics'94. Oslo Norway: Blackwell Ltd., 1994. 179~184.

Controllable 3D Morphing*

FANG Xiang, BAO Hu-jun, PENG Qun-sheng

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

E-mail: {xfang,bao,peng}@cad.zju.edu.cn

http://www.zju.edu.cn

Abstract: A 3D Morphing algorithm based on distance field interpolation is presented in this paper. This method uses analytic distance field to implement 3D Morphing, which makes the smoothness of the transformation shapes not depending on the discrete accuracy of original models. The interactive Morphing algorithm based on some constrained points and Morphing influence shapes is also given in this paper, which allows users to control Morphing procedures intuitively and conveniently. Several Morphing examples show that this algorithm can generate the controllable transformation shapes between any two oriented manifold models.

Key words: 3D Morphing; distance field; implicit surface; computer animation

* Received December 17, 1999; accepted March 13, 2000

Supported by the National Natural Science Foundation for Excellent Young Scholar of China under Grant No. 69925204; the Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China under Grant No. 697011; the Science Foundation of Innovative Research Groups under Grant No. 60021201