

一种新的基于 factor curve 的变形控制方法

金小刚 鲍虎军 彭群生

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘要 本文提出了一种新的基于 factor curve 的变形控制方法. Barr 的整体非线性变形和 Watt 的时空因子曲线方法都不同程度地依赖于某种解析表达式, 不便于进行统一的控制. 作者首次对因子曲线进行了分类, 提供了一种统一的控制方式, 因而非常适合于动画系统. 把因子曲线本身作为可变参数的动画控制方法不仅包含了 Barr 的 tapering 和 twisting 操作, 而且还包含了 Watt 的因子曲线变形控制方法, 因而动画师有更多的余地对变形进行有效的控制.

关键词 空间变形, 因子曲线, 扭曲变形, 渐细变形.

变形是一种非常重要的计算机动画技术^[1], 动画中的许多新奇效果往往是通过物体的变形来实现的. 变形的的方法可分为 2 种: 一种是与物体表示有关的; 另一种是与物体表示无关的.^[2]直接移动物体的顶点或控制顶点来实现变形是一种与物体表示有关的变形方法. 如通过直接移动顶点来获得多面体变形、直接移动参数曲面的控制顶点来实现曲面变形以及层次 B 样条曲面变形方法^[3]等均为与物体表示有关的变形方法. 当物体的顶点或控制顶点数目较少, 或者需移动的顶点较少时, 该方法是一种有效的方法. 它的优点在于可以对物体的变形进行极为细微的控制. 但是, 若我们要对物体进行某种整体变形, 或者需移动的顶点非常多时, 该方法将导致大量的人力耗费. 另外, 与物体表示有关本身决定了这种变形方法缺乏通用性. 近 10 年来, 人们越来越重视与物体表示无关的变形方法, 因为这种变形操作很容易结合到现有的造型和动画系统中. Barr 提出的整体和局部变形方法是这一方面最早的工作.^[4]后来, Sederberg 等人提出称之为 FFD (free-form deformation) 的自由变形方法^[5], FFD 方法不是直接对物体进行变形, 而是对物体所嵌入的空间进行变形. 待变形的物体被嵌入基于三变量 Bezier 体的 lattice 空间, 然后通过移动 lattice 的顶点使 lattice 空间产生变形, 因而物体也相应地随之变形. FFD 方法中 lattice 块的形状为平行六面体, 这在一定程度上限制了它的应用. Coquillart 提出的拓广的 FFD 方法—EFFD (extended FFD) 允许初始的 lattice 为棱柱和圆柱等形状^[6], 从而扩大了 FFD 的适用范围. RFFD (rational FFD)

* 本文研究得到国家自然科学基金资助. 作者金小刚, 1969 年生, 博士生, 主要研究领域为计算机动画, 真实感图形等. 鲍虎军, 1966 年生, 博士, 副研究员, 主要研究领域为光照明模型, 计算机动画, 可视化技术, 真实感图形算法. 彭群生, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室副主任, 主要研究领域为真实感图形, 计算机动画, 三维几何造型, 工程图纸扫描输入等.

本文通讯联系人: 金小刚, 杭州 310027, 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室

本文 1996-03-04 收到修改稿

方法和基于 NURBS 体的 FFD 方法提供了更广泛的变形控制。^[7,8]

柔性物体动画的一个非常重要的应用是把传统的二维角色动画推广到三维。从最近几年计算机动画节所展映的动画片中可以看到,动画师已能制作出可与 Disney 公司制作的动画片媲美的三维角色动画。柔性物体动画是制作三维角色动画非常有力的工具之一,它可使动画师对三维角色的模型和个性进行有效的控制。柔软物体变形的动画设置可通过改变物体的顶点、控制顶点或物体所嵌入的 lattice 控制顶点来实现。^[9]但不管是哪类变形,一般只适合于移动顶点较少的简单的变形。对于需移动大量点的复杂变形时,用上述工具就显得比较困难。因此,有必要采用更高层的控制手段来驱动低层物体的变形。在动画制作实践中我们发现,若一个变形方法要求用户交互的越少,控制越容易,能控制的范围越广,则该变形方法越成功。我们设计的新方法将尽量遵循以上原则。

1 非线性整体变形和因子曲线

在标准的三维坐标变换中,无论是物体的旋转、平移还是比例缩放,变换矩阵对它所作用的物体上的各个点均保持不变。1984 年 Barr 提出了非线性整体变形的思想,即变换矩阵作用于物体的各部分时将因其顶点位置的不同而改变其变换参数阵,因而变换成了被变换对象位置有关的函数^[4],导致物体的变形。在该方法中,变形后物体的法向量可通过原物体的法向量和变换矩阵解析求得。Barr 的整体非线性变形推广了传统的造型变换,使得变换随被作用对象的位置发生改变。他所列的 tapering, twisting 和 bending 操作都是动画设计中常常会遇到的,但他更侧重于造型方面的讨论,而没有对变形动画设置作进一步的研究。他所提出的 bending 操作,由于不够直观和不易控制,已明显缺乏生命力。近几年出现的轴变形和轨迹变形不仅包含了 bending 操作^[10~12],而且在交互性和控制方面比 bending 操作好得多。因而后面的讨论侧重于 tapering 和 twisting 操作。

把 Barr 的非线性变形进行推广,我们可以得到一个简单而有效的变形动画设置方法。Barr 的非线性变形的中心思想为对作用于物体的变换参数进行加权(Weighting),而权为位置的函数。如在渐细(Tapering)变形中,作用于 x, y 方向的比例缩放因子的权为被变换点 z 坐标的函数。Watt 将改变变换参数的函数称为因子曲线(Factor Curve)。按此定义, Barr 所定义的因子曲线只是空间的函数。Watt 推广了因子曲线的定义域,使它不仅包含空间域,还包含时间域,以满足动画设计的需要。^[2]推广了的因子曲线能使动画师通过因时因地改变作用于物体的变换来控制物体的变形。通常,当因子曲线用来对参数进行加权时,是以数乘的方式进行的。Watt 对它进行推广,使它也可以加减的方式进行。采用因子曲线的变形动画设置分成 2 部分:① 由一系列变换给出变形的范围,并给出变换的参数化方式。② 根据动画设计的需要,用时空因子曲线改变变形变换的参数。

假设用因子曲线来模拟一只调羹跳向空中然后落地的过程,为了使调羹拟人化,调羹起跳时,可使它的头向后摆;调羹落地时,可使它的头向前倾。该变形可通过 FFD 来实现(见图 1),FFD 由 $3 \times 3 \times 7$ 块超曲面构成,在 w 方向设置高精度的目的是为了调羹变形光滑。为了方便起见,我们在 lattice 空间讨论问题。显然,FFD 块内的任一点可由 $(u, v, w) \in [0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1]$ 来指定。该 FFD 块的动画设置过程可分成以下 2 步:① 所作的变换为绕 v

轴旋转. 设绕该轴的旋转角参数为 θ 角. ② 空间因子曲线 $f_{\theta w}(u)$ 的方向为沿 w 轴, 随着 w 的增大, $f_{\theta w}(w)$ 的值逐渐增大. 该曲线作用于 θ 的结果使 FFD 块沿 w 轴弯曲. 物体上的点在 FFD 块中的位置越高, w 的值越大, 偏离 w 轴的弯曲程度也越大. 由于 $f_{\theta w}(0)=0$, FFD 块的最下面部分不变形, 这样保证了调羹在 FFD 区域内部分与 FFD 区域外部分交接处曲面的连续性. 时间因子曲线 $f_{\theta t}(t)$ 的初始值为一较大的负值, 对应于调羹的上半部分向后弯曲, $f_{\theta t}(t)$ 变至 0 时, 对应于调羹没有变形; 最后变至一较小的正值, 对应于调羹稍稍向前倾.

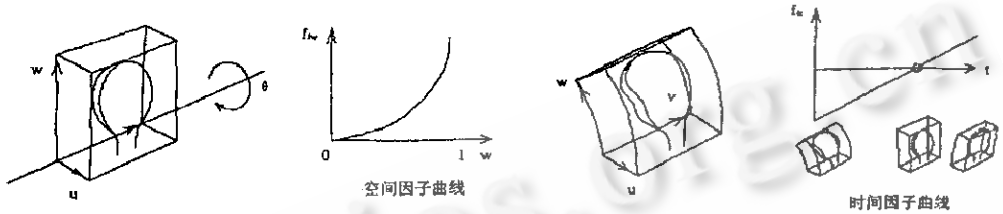


图 1 调羹跳动对应的因子曲线

给定 θ 的初始值 θ_0 , 任一点 (u, v, w) 的变形变换为绕 v 轴旋转下面的角度:

$$\theta = \theta_0 f_{\theta w}(w) f_{\theta t}(t)$$

该表达式表达了一大类强有力的动画参数化方法. 因子曲线 $f_{\theta w}()$ 和 $f_{\theta t}()$ 可以以解析的方式给出, 也可以用样条交互给出. 用样条交互给出的优点在于有很强的直观性, 且易于控制.

2 对因子曲线设置动画的变形控制方法

在 Watt 的因子曲线控制方法中, 时间因子曲线和空间因子曲线是彼此独立的, 即不管在什么时候, 空间因子曲线的形状都是不变的, 时间因子曲线仅仅作为空间因子曲线的权. 例如, 对于调羹跳向空中的例子, 变形变换绕 v 轴的旋转角 θ 为: $\theta = \theta_0 f_{\theta w}(w) f_{\theta t}(t)$. 在任一时刻 t , θ 函数的形状都与 $\theta_0 f_{\theta w}(w)$ 相似, 唯一的区别为一比例因子 $f_{\theta t}(t)$, 用户无法使 θ 函数的形状与 $\theta_0 f_{\theta w}(w)$ 不同. 为此, 我们提出把因子曲线作为关键帧的参数, 即允许因子曲线在变形过程中发生改变. 把因子曲线作为关键帧参数的优点在于动画师可以根据动画设计的需要设计关键帧因子曲线的形状, 从而对物体的变形进行更为灵活、细腻的控制. 在上述例子中, 只需使第 1 个关键帧的因子曲线形状为 $k_1 \theta_0 f_{\theta w}(w)$, 第 2 个关键帧的因子曲线为 $k_2 \theta_0 f_{\theta w}(w)$, 即可满足要求. 其中 k_1, k_2 分别为 $f_{\theta t}(t)$ 在相应时间的值. 设物体未变形时的包围盒为 $[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}]$ (若为参数曲面, 取的是控制顶点的包围盒), 把它规范化后, 物体的任一点 (x, y, z) 可用 $(u, v, w) \in [0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1]$ 来指定. 其中

$$u = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad v = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad w = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}$$

因为标准的三维变换可分为 3 类: 平移 T , 比例缩放 S 和旋转 R , 因此可用 27 条因子曲线来控制物体的非线性变形, 它们为:

$T_x(u), T_x(v), T_x(w)$: 控制 x 方向的平移变形; $T_y(u), T_y(v), T_y(w)$: 控制 y 方向的平移变形; $T_z(u), T_z(v), T_z(w)$: 控制 z 方向的平移变形; $S_x(u), S_x(v), S_x(w)$: 控制 x 方向的比例缩放变形; $S_y(u), S_y(v), S_y(w)$: 控制 y 方向的比例缩放变形; $S_z(u), S_z(v), S_z(w)$: 控制 z 方向的比例缩放变形; $R_x(u), R_x(v), R_x(w)$: 控制 x 方向的旋转变形; $R_y(u), R_y(v), R_y(w)$:

(w):控制 y 方向的旋转变形; $R_x(u), R_z(v), R_z(w)$:控制 z 方向的旋转变形.

其中 R 类变形适合于扭曲类变形, S 类变形适合于渐细变形, T 类变形适合于平移变形. 每条因子曲线用一插值端点的 3 次 NURBS 曲线 $f(u)$ 来表示:

$$f(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i B_{i,4}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i B_{i,4}(u)} \quad (n \geq 3)$$

其中 $\{P_i\}_{i=0}^n$ 为控制顶点, w_i 为权, $B_{i,4}(u)$ 为 3 次 B 样条基函数, 结点向量为 $u_0 = u_1 = u_2, u_3, u_4, \dots, u_{n-1}, u_n = u_{n+1} = u_{n+2}$. 控制顶点的个数可根据动画设计的需要来定. 采用 NURBS 曲线的优点在于交互控制方便灵活, 但有如下缺点: ① 因子曲线沿 u, v, w 轴的单调性需由用户来保证; ② 给定物体上的点, 要求得相应因子曲线的值, 需先迭代反求相应的参数. 一个解决方法为采用查找表.

设 t_1 时刻的关键帧因子曲线为 f_1, t_2 时刻的关键帧因子曲线为 f_2 , 则在 $t \in [t_1, t_2]$ 时的因子曲线为

$$f(u) = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} f_1(u) + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} f_2(u)$$

若 f_1 和 f_2 具有相同的结点向量和权, 控制顶点为 P_1^i 和 P_2^i , 则

$$f(u) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n w_i B_{i,4}(u)} \sum_{i=0}^n w_i \left(\frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} P_1^i + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} P_2^i \right) B_{i,4}(u)$$

对因子曲线进行上述分类提供了一种统一的控制方式, 因而控制渐细变形和扭曲变形可象控制物体的平移、比例缩放和旋转变换一样方便, 适合于交互式的动画系统中. 将因子曲线本身作为可变参数的动画控制方法不仅包含了 Barr 的 tapering 和 twisting 操作, 还包含了 Watt 的因子曲线变形控制方法, 因而动画师有更多的余地对变形进行有效的控制.

3 实验和结论

图 4 为 tapering 的例子, 相应的关键帧因子曲线见图 2, 图的左半部分为起始帧的关键帧因子曲线, 右半部分为终止帧的关键帧因子曲线. 用 Watt 的方法是难以做出这 2 个例子的效果的. 图 5 为 tapering 和 twisting 相结合的例子, 相应的关键帧因子曲线见图 3.

Barr 的整体非线性变形和 Watt 的时空因子曲线方法都不同程度地依赖于某种解析表达式, 不便于进行统一的控制. 对因子曲线进行上述分类提供了一种统一的控制方式, 因而非常适合于动画系统.

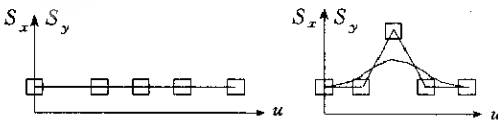


图2 关键帧因子曲线

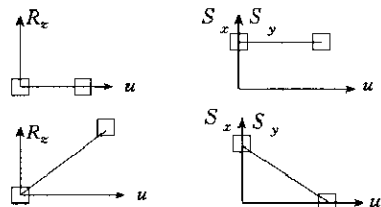


图3 关键帧因子曲线

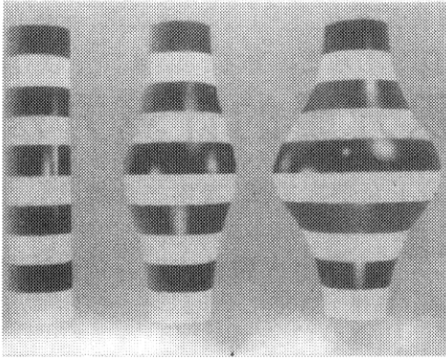


图 4

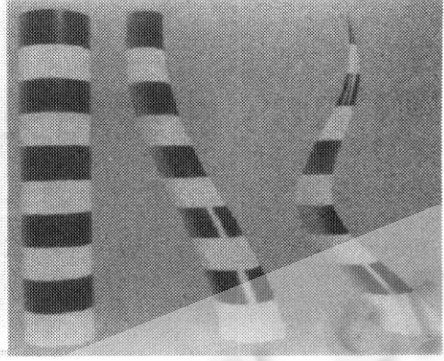


图 5

参考文献

- 1 Bechmann D. Space deformation models survey. *Computers & Graphics*, 1994, **18**(4):571~586.
- 2 Watt A, Watt M. *Advanced animation and rendering techniques*. Addison—Wesley Publishing Company, 1992.
- 3 Forsey D R, Bartels R H. Hierarchical B—spline refinement. *Computer Graphics*, 1988, **22**(4):205~212.
- 4 Barr A H. Global and local deformations of solid primitives. *Computer Graphics*, 1984, **18**(3):21~30.
- 5 Sederberg T W, Parry S R. Free—form deformation of solid geometric models. *Computer Graphics*, 1986, **20**(4):151~160.
- 6 Coquillart S. Extended free—form deformations: a sculpturing tool for 3D geometric modeling. *Computer Graphics*, 1990, **24**(4):187~196.
- 7 Kalra P, Mangili A, Thalmann N M *et al.* Simulation of facial muscle actions based on rational free form deformation. *Computer Graphics Forum*, 1992, **2**(3):59~69.
- 8 Lamousin H J, Waggenspack W N Jr. NURBS—based free—form deformations. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1994, **14**(9):59~65.
- 9 Coquillart S, Jancene P. Animated free form deformation: an interactive animation technique. *Computer Graphics*, 1991, **25**(4):23~27.
- 10 Lazarus F, Coquillart S, Jancene P. Axial deformations: an intuitive deformation technique. *Computer Aided Design*, 1994, **26**(8):607~612.
- 11 Chang Y K, Rockwood A P. A generalized de casteljau approach to 3D free—form deformation. *Computer Graphics*, 1994, **28**(3):257~260.
- 12 金小刚. 计算机动画基础算法研究[博士论文]. 浙江大学, 1995.

A NEW DEFORMATION CONTROL METHOD BASED ON FACTOR CURVES

Jin Xiaogang Bao Hujun Peng Qunsheng

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

Abstract This paper proposes a new deformation control method based on the factor curves. Both Barr's global nonlinear deformation and Watt's space-time factor curves depend on some kinds of analytical expressions hence. The authors classify the factor curves and provide a unified deformation control method which is convenient for animation systems. By taking the factor curves as animation parameters, the new control method not only includes Barr's tapering and twisting operations but also Watt's factor curve control method. Animators can control the deformation effectively with the method.

Key words Space deformation, factor curve, tapering, twisting.