第8卷第4期
1997年4月

软 件 学 报
JOURNAL OF SOFTWARE

Vol. 8, No. 4
Apr. 1997

计算机动画技术综述*

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 本文从关键帧动画、变形物体动画、过程动画、关节动画和人体动画、基于物理的动画几个方面，对计算机动画作了一个较全面的综述.

关键词 关键帧动画，变形物体动画，过程动画，关节动画，人体动画.

中图分类号 TP391

随着计算机图形学和硬件技术的高速发展，人们已经可以用计算机生成高质量的图象，计算机动画不再是陌生的名词. 计算机动画在近十年的发展可以说是辉煌的，它已渗透到人们生活的各个角落. 在《侏罗纪公园》和《终结者Ⅱ》等优秀电影中，人们可充分体会到计算机动画高超技术的魅力. 计算机动画不仅可应用于商业广告、电视片头、电影电视特技、动画片、游艺场所，还可用于教育、军事、飞行模拟、科研，甚至于法院案件的审理.

简单地讲，计算机动画是指用绘制程序生成一系列的景物画面，其中当前帧画面是对前一帧的部分修改. 动画是运动中的艺术，正如动画大师 John Halas 所讲的，运动是动画的要素. 当然，这里所讲的运动不仅指景物的运动，还包括虚拟摄像机的运动、纹理、色彩的变化等. 所以，计算机动画中的运动泛指使画面发生改变的动作. 本文所指的是三维计算机动画，而非传统的卡通动画. 计算机动画所生成的是一个虚拟的世界，画面中的物体并不需真正去建造，物体、虚拟摄像机的运动也不会受到什么限制，动画师几乎可以随心所欲地编织他的虚幻世界. 计算机动画的分类方法很多，我们将从关键帧动画、变形物体的动画、过程动画、关节动画和人体动画、基于物理的动画几个方面对计算机动画作一个较全面的综述.

1 关键帧动画

关键帧的概念来源于传统的卡通片制作. 在早期 Walt Disney 的制作室，熟练的动画师设计卡通片中的关键画面，也即所谓的关键帧，然后由一般的动画师设计中间帧. 在三维计算机动画中，中间帧的生成由计算机来完成，插值代替了设计中间帧的动画师. 所有影响画面图象的参数都可成为关键帧的参数，如位置、旋转角、纹理的参数等. 关键帧技术是计算机

---

* 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，讲师，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，真实感图形算法，计算机动画与可视化技术等. 彭群生，1947年生，博士，教授，主要研究领域为真实感图形，计算机动画，三维几何造型，工程图纸扫描识别等.

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1996-04-17收到修改稿

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

动画中最基本并且运用最广泛的方法.另外一种方法是样条驱动动画.在这种方法中,用户指定物体运动的轨迹样条,轨迹样条由用户交互给出.

无论是样条驱动动画还是关键帧插值方法,都会碰到这个问题:给定一条物体运动的轨迹,求物体在某一帧的位置.物体运动的轨迹一般由参数样条来表示.如果直接对参数空间进行等间隔采样,势必会带来运动的不均匀性,因而有必要对样条进行弧长参数化.Guenter 等提出用 Gauss 型数值积分方法计算弧长[1],用 Newton-Raphson 迭代来确定给定弧长点在曲线上的位置,并采用查找表法记录参数点弧长值的方法来加速计算.在动画设计中,动画师经常需调整物体运动的轨迹来观察物体运动的效果,交互的速度是一个很重要的因素.Watt 等提出了用向前差分加查找表的方法来提高交互的速度.[2]在精度要求不是很高的情况下,他们的方法非常有效.

从原理上讲,关键帧插值问题可归结为参数插值问题,传统的插值方法都可应用到关键帧方法中.但关键帧插值又与纯数学的插值不同,它有其特殊性.为了很好地解决插值过程中的时间控制问题,Steketee 等提出了用双插值的方法来控制运动参数.[3]其中之一为位置样条,它是位置对关键帧的函数;另一条为运动样条,它是关键帧对时间的函数.Kochanek 等提出了一类适合于 keyfame 系统的 3 次插值样条[4],他们把关键帧处的切矢量分成入矢量和出矢量 2 部分,并引入 3 个参数:张量 t、连续量 c 和偏移量 b 对样条进行控制.该方法允许动画师在不调整关键帧的情况下调整物体的运动.

关键帧插值系统中要解决的另一个问题是物体朝向的插值问题.物体的朝向一般可由 Euler 角来表示,因此朝向的插值问题可简单地转化为 3 个欧拉角的插值问题.但欧拉角又有它的局限性.因为旋转矩阵是不可交换的,欧拉角的旋转一定要按某个特定的次序进行;等量的欧拉角变化不一定引起等量的旋转变化,导致了旋转的不均匀性;欧拉角还有可能导致自由度的丧失,即所谓的"gimble lock"现象.Shoemake 为了解决因采用欧拉角表示引起的麻烦,最早把四元数引入了动画中,并提出了用单位四元数空间上的 Bezier 样条来插值四元数.[5]Barr 等人提出了一个采用四元数对带有角速度约束的景物的朝向进行光滑插值方法[6],他们的方法允许用户对轨迹端点处的角速度进行约束.首先把关键帧处的旋转角转化为四元数,然后把非欧几里德空间四元数路径的切向加速度取极小,并用有限差分和最优化方法数值求解得到的能量方程.Kim 通过构造一组新的基,提出了把 R^3 空间曲线变换到单位四元数空间曲线的一般性方法[7].

2 变形物体的动画

一般的刚体动画,虽然也能给人带来眼花缭乱的视觉效果,但总是缺乏生气.传统动画的一个显著特点是赋予每个角色以个性,并以形状变形来渲染某些夸张的效果.虽然传统动画的许多效果用三维动画还很难做到,但计算机动画的研究者们在形状变形方面已做了不少出色的工作.如迈克尔·杰克逊的音乐录音带"黑与白"这首歌中 13 个不同性别和种族的人的相互渐变;电影《终结者Ⅱ》中机械杀手 T-1000 由液体变为金属人,由金属人变为影片中的其它角色.大部分变形方法与物体的表示有密切的关系,如通过移动物体的顶点或控制顶点来对物体进行变形.为了使变形方法能很好地结合到造型和动画系统中,近 10 年来,人们提出了许多与物体表示无关的变形方法.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

对于多边形表示的物体，物体的变形可通过移动其多边形顶点来达到. 但是，多边形的顶点以某种内在的连接关系相关连，不恰当的移动很容易导致三维走样问题，比如原来共面的多边形变成了不共面的. 参数曲面表示的物体可较好地克服上述问题. 移动控制顶点仅仅改变了基函数的系数，曲面仍然是光滑的，所以参数曲面表示的物体可处理任意复杂的变形. 但是，参数曲面表示的物体也会带来三维走样问题，由于控制顶点的分布一般比较稀疏，物体的变形不一定是我们所预想的；对于由多个面拼接而成的物体，变形的另一个限制是需保持相邻曲面间的连续性. Forsey 和 Bartel 提出的层次 B 样条变形方法是 B 样条曲面变形方法的一个很大发展.[8]他们解决了变形范围的大小问题，即用户可在更局部的范围控制曲面的变形，并且无需产生过多的控制顶点. 多边形和参数曲面表示各有其优缺点. 参数曲面不能表示拓扑结构比较复杂的形体，对于非矩形域的拓扑结构，参数曲面表示起来较为困难；而多边形表示则可以表示任意形状的物体.

顾名思义，与物体表示无关的变形方法既可作用于多边形表示的物体，又可作用于参数曲面表示的物体. Barr 提出的整体和局部变形方法是这一方面最早的工作.[9]他的创新性在于在变换作用于物体的各部分时不断修改变换矩阵，变换矩阵成为位置的函数. Watt 等拓广了 Barr 的 factor 曲线的定义范围[2]，使得 factor 曲线不仅包含空间域还包括时间域，因此 factor 曲线成了随空间和时间变化的函数. 通过把因子曲线分类和作为可变参数，我们提出了一种统一、有效的整体变形控制方法.[10]与物体表示无关的另一种变形方法为自由变形方法 FFD.[11]FFD 方法不对物体直接进行变形，而是对物体所嵌入的空间进行变形. 该方法中的 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 方法消除了平行六面体 lattice 的限制[12]，使得初始的 lattice 允许棱柱和圆柱这种形状. Lamousin 提出的基于 NURBS 的 FFD 方法 NFFD 提供了更有效的控制.[13] Ruprecht 提出了一种通过散乱数据插值的空间变形方法.[14]当物体的变形可通过移动 lattice 的控制顶点来实现时，上述各模型提供了强有力的变形工具. 但是当变形比较复杂以致于 lattice 变形和物体变形之间的对应关系并非很直观时，基于 FFD 的变形方法就显得比较困难. Borrel 提出了空间变形的简单约束变形法.[15]在该方法中，用户通过定义一系列约束点、所需的偏移量和影响半径来控制变形. Hsu 等于 1992 年提出了一种通过物体上点的偏移来反求 lattice 顶点，从而达到直接操纵物体变形的方法.[16]Coquillart 允许变形工具和物体单独设置动画[17]，而并非在动画过程中保持物体和 lattice 的对应关系不变，因此物体的 lattice 空间坐标可不再保持不变. 基于 FFD 的变形动画方法总是需要移动许多控制顶点，当控制顶点较多时交互就变得很差. Lazarus 等所提出的基于轴的变形方法(AxDf)提供了一种直观的变形技术.[18]该方法的优点在于把物体的变形转化为轴线的变形，而对轴线设置动画是比较容易的. Chang 等人的方法与 Lazarus 的方法从效果上看类似[19]，但基于不同的数学原理. 我们提出的基于弧长不变的轴曲线变形使轴变形的动画设置更加方便实用.[20]

二维图象的自然变形在教育和娱乐方面都是一种非常有用的技术. 当对应的 2 个物体很容易造型时，三维形体变形是一种可行的方法. 但由于三维变形技术往往对物体中多边形的个数、拓扑结构和顶点之间的对应关系附加苛刻的限制，这大大缩小了三维变形的适用范围，用图象处理技术反而方便得多. 较早的工作有 Wolberg 的网格变形技术[21]，后来 Beier

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn

提出了一种基于线对的自然变形技术.[22]给定一幅人或动物的图象,用二维 morphing 技术使得图象中的人或动物做出某种表情是一件既困难又费时的事. Liwinowicz 先用摄像机摄得一真人讲话、做某种表情时的动作,然后用交互方式勾划出该人的特征线,并用这些特征线去控制别的人、动物或卡通画,取得了非常精彩的效果.[23]

对于 2 个二维多边形之间的渐变,一般采取顶点之间的线性插值,即顶点的 keyframe 方法. 但该方法生成的多边形有可能产生自交和不应有的收缩. 1992 年,Sederberg 等提出了一种基于物理的二维形状变形方法[24],他们把形状看成由电线框构成,然后求解所需能量最小的形变解. 1993 年,他们用多边形的内在定义来实现多边形的形变[25],避免了以前角色动画中所出现的收缩和扭结现象. 在 2 个三维形体之间的变形方面,也出现了许多创造性的结果. 三维形体之间的变形与物体的拓扑结构有密切的联系. Chen 提出了一个二维分段线性轮廓线的变换算法,然后讨论了三维放样物体的变形问题[26]. Payne 先把每个多面体转换成一个距离场的体表示[27],然后对三维体的每一点插值得到一个新的等值面,而这个等值面表示了原物体的某种组合. Kent 等人提出通过合并多面体对的拓扑结构[28],使得它们有相同的顶点—边—面结构网. Lerios 推广了 Beier 的线对思想,提出了基于 volume 的三维物体变形方法,这种方法具有一般性[29].

在计算机动画中,人体造型是一个颇为艰巨的问题. 人的肌肉不仅形状复杂,而且随人体的运动而变形,元球是解决这类问题的有效手段. 采用 metaball 进行造型是由 Blinn 和 Nishimura 独立引入的[30],一个复杂的人体只需 500 个左右的 metaball. 元球是具有密度的特殊的球,一簇 metaball 的密度为该簇中所有 metaball 密度之和,对应的三维模型可表达为由等密度面围绕的体. 由于 metaball 的特殊密度分布,多个 metaball 可融合成一个光滑的面. 现在 metaball 不再局限于简单的球,椭球也可作为其基本元素. 通过位置、朝向、大小和密度的巧妙控制,可用 metaball 生成许多复杂的形体,而这些形体又是传统造型方法很难做到的. 为了快速绘制元球,Nishita 提出把光线上的场函数用 Bezier 函数表示[31],然后用 Beizer Clipping 求根. 无论光线与等势面是否有交,该求根方法都非常有效. 采用元球造型,物体的变形能以一种自然的方式进行. Desbrun 采用元球造型模拟了无弹力物体的熔接和分离过程[32].

3 过程动画

过程动画指的是用一个过程去控制物体的动画. 过程动画经常牵涉到物体的变形,但与前面所讨论的柔性物体的动画不一样. 在柔性物体的动画中,物体的形变是任意的,可由动画师任意控制的;在过程动画中,物体的变形则基于一定的数学模型或物理规律. Reeves 的粒子系统是过程动画的较早工作,他于 1983 年所发表的论文中成功地提出了一种模拟不规则模糊物体的景物生成系统.[33]在他的工作中,造型和动画连成一体. 粒子系统已经成功地模拟了电影《Star Trek Ⅱ: The Wrath of Khan》中的一系列特技镜头. 后来,Reeves 和 Blau 发展了粒子系统,他们用"volume filling"基本单元去生成随时间改变形状但又基本保持不变的实体[34],如草叶随风的飘动. 粒子系统的一个主要的优点是数据库放大的功能,比如 Reeves 声称用 3 个基本的描述便可生成由百万个粒子构成的森林景色. 粒子系统还可用来

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

模拟由风引起的泡沫和溅水的动画. 最近，Reed 等人用粒子系统成功地模拟了闪电.[35]在生物界，许多动物如鸟、鱼等以某种群体的方式运动. 这种运动既有随机性，又有一定的规律性. Reynolds 提出的群体动画成功地解决了这一问题[36]. 群体的行为包含 2 个对立的因素，即既要相互靠近又要避免碰撞. 他用 3 条按优先级递减的原则来控制群体的行为.

最近几年，布料动画成了人们感兴趣的研究课题. 布料动画的一个特殊应用领域为时装设计，它将改变传统的服装设计过程，可让人们在衣服做好之前看到服装的式样和试穿后的形态. 1986 年，Weil 提出了一种基于几何的布料物体造型方法.[37]他把布料悬挂在一些约束点上，基于悬链线计算出布料自由悬挂时的形状. 基于几何的方法不考虑布料的质量、弹性系数等物理因素，因而很难逼真地生成布料的动画. 近几年，研究者们更多地用基于物理的方法去模拟. 基于弹性理论，Terzopoulos 等人提出了一种控制变形曲面运动的方法[38]，并用来模拟旗帜的飘动和地毯的坠落过程. Carigan 等人扩展了 Terzopoulos 的方法，很好地模拟了一个穿着衣服的演员的动画.[39]Breen 把布理解成由一系列线穿梭的交叉点构成，根据“interacting particle”方法，提出了一个丝织布料的理论模型，很好地模拟了布的悬挂效果.[40]他还模拟了由某种特定的纤维编织成的布放于别的物体上的形态.[41]

4　关节动画和人体动画

在三维计算机动画中，把人体作为其中的角色一直是研究者感兴趣的目标，因而关节动画越来越成为人们致力解决的研究课题. 近期在这一方面的工作令人惊叹不已，如电影《终结者Ⅱ》、《侏罗纪公园》. 虽然计算机动画在广告、娱乐、教育、科学计算可视化和仿真等领域占据越来越重要的角色，人体和动物动画的许多问题仍未很好解决. 人体具有 200 个以上的自由度和非常复杂的运动，人的形状不规则，人的肌肉随着人体的运动而变形，人的个性、表情等千变万化. 可以说，人体动画是计算机动画中最富挑战性的课题之一.

正向或逆向运动学是设置关节动画的有效方法. 通过对关节旋转角设置关键帧，得到相关连各个肢体的位置，这种方法一般称为正向运动学方法. Denavit 和 Hartenberg 最早提出了一种通过相对坐标系来描述各个关节位置的矩阵描述方法，并被从事关节动画的研究者广泛应用. 对于一个具有多年经验的专家级动画师，能够用正向运动学方法生成非常逼真的运动. 但对于一个普通的动画师来说，通过设置各个关节的关键帧来产生逼真的运动是非常困难的. 一种实用的解决方法是通过实时输入设备记录真人各关节的空间运动数据. 由于生成的运动基本上是真人运动的复制品，因而效果非常逼真，且能生成许多复杂的运动. Witkin 通过混合运动参数曲线来编辑捕获的动画，从而使建立可重用的运动库成为可能.[42]但这种方法终究缺乏灵活性. 逆运动学方法在一定程度上减轻了正运动学方法的繁琐工作，用户通过指定末端关节的位置，计算机自动计算出各中间关节的位置. Girard 提出了一种用逆运动学生成关节运动的方法.[43,44]在他们的方法中，用户指定脚的世界坐标系位置，然后用伪逆 Jacobian 矩阵求解从脚到臀部关节的旋转角. 该方法是生成逼真关节运动的最好方法之一. Badler 等人的方法允许对关节多重约束，当所有的约束不能同时满足时则按约束的重要性排序，并采用迭代法求解逆运动学方程.[45]把运动学和动力学相结合允许动画师以适合他的方式思考问题. Isaacs 等人提出的动力学运动学系统具有与以前不同

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn

的3个特色[46]：①把传统的关键帧系统嵌入到动力学分析中作为运动学约束；②能够定义行为函数以对周围的环境起反应；③用逆动力学来决定产生特定运动的力. Isaacs 把运动学和动力学约束显式表达出来，然后求解这些方程. 遗憾的是，这种方法的计算量极大.

与运动学相比，动力学方法能生成更复杂和逼真的运动，并且需指定的参数相对较少. 但动力学方法的计算量相当大，且很难控制. 动力学的一种方法为 Gibbs-Appell 矩阵方法，由于它的通用性，该方法有较大的吸引力[47,48]. 与 Lagrangian 法类似，该方法采用作用于某一自由度的广义力的概念，并且只需考虑运动的实际自由度. 因此，使关节自由度减少的关节约束并不需用单独的方程列出. 遗憾的是，使用该方法产生的矩阵并不稀疏，而且求解加速度的计算量出奇的大，因而 Gibbs-Appell 方法渐渐被人们所抛弃. 基于 Euler 动力学方程，Armstrong 提出的递归方法避免了矩阵的建立过程.[49]该递归方法的复杂度与自由度的个数呈线性关系，速度快而且稳定. 动力学方法中另一重要问题是运动的控制，若没有有效的控制手段，用户就必须提供具体的如力和力矩这样的控制指令，而这几乎是不太可能的. 因而，有必要提供高层的控制和协调手段. 能够满足上述要求的一种方法是预处理方法. 该方法把所需的约束和控制转换成适当的力和力矩，然后包括到动力学方程中.[47,48]另一种方法将约束以方程的形式给出. 如果约束方程的个数与未知数的个数相等，也即系统是全约束的，则可用一般的稀疏矩阵法快速求解. 但如果系统是欠约束的，则情形就比较复杂，因为有无穷多的解. 例如，给定手的到达目标，就有使手到达所要求位置的许多关节构造方法. Witkin 提出了一种使某种目标函数极小的附加约束方法[50]，并用共轭梯度法求解. 在上述例子中，目标函数可选为运动的总动能. 在基于目标的运动控制方面，较早的有 Zeltzer 的工作.[51]在他的面向任务的系统中，能实现诸如行走和跳跃这样的人体运动. 但他在计算关节旋转角时，采用的是运动学和对测试数据插值的方法，因而不能实现如改变速度、改变步长这样的运动控制. Bruderlin 提出了一个人体走路动画的混合方法，该方法结合了基于目标的和动力学2种运动控制技术.[52]他们把运动周期的知识结合到一个层次控制过程中，所需要的运动可以很方便地在顶层以一个任务的方式指定(比如以速度 v 行走)，然后把任务分解成低层的小任务用动力学模型去求解. 在 Boulic 提出的具有实时运动学个性的人体行走模型中[53]，行走模型来源于实验数据，并分为2级来控制. 第1级产生运动的整体时空参数，第2级由参数化的轨迹生成人体关节的空间位置. 他们的运动学方法同样包含了人体行走的动力学特性.

指定关节动物的运动，使它能以符合物理规律真实的方式达到给定的目标(如投一个篮球到球框中)是动画师的目标之一. Witkin 等人所提出的时空约束是生成角色动画的一种新方法.[50]在时空约束方法中，动画师指定角色必须做什么；怎样运动；角色的物理结构；角色为完成运动可利用的物理资源. 基于这些描述，加上牛顿定律，构成一个约束的最优化问题. 求解该约束问题得到一个符合物理规律的运动. 时空约束得到的是一个非线性约束变分问题，通常该问题没有唯一解. 一个解决方法是用三次 B 样条基函数的线性组合来减少可能的轨迹数，并用约束优化来求解 B 样条的系数. 但这类非线性优化问题的一般解是未知的. Cohen 提出采用符号和数值混合技术来进行交互控制.[54]在该系统中，用户能干涉迭代数值优化过程并能指导优化过程使它收敛到可接受的解. 但是随着关节数和任务复杂度的增加，其计算量仍然很大. Liu 等人提出用小波基来表示广义自由度对时间的函数[55]，该方

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

法的优点在于能自动地只在需要的地方增加运动细节,从而使离散变量的数目减少到最小,求解的收敛速度更快.

在脸部表情的动画模拟方面,较早的方法有用数字化仪将人脸的各种表情输入到计算机中,然后用这些表情的线性组合来产生新的脸部表情.该方法的缺点是缺乏灵活性,不能模拟表情的细微变化,并且与表情库有很大关系.1987 年,Waters 提出了一个基于 Facial Action Coding System 的脸部表情动画模拟方法.[56]该方法由一个参数肌肉模型组成,人的脸用多边形网格来表示,并用肌肉向量来控制人脸的变形.它的特点在于可用一定数量的参数对模型的特征肌肉进行控制,并且不针对特定的脸部拓扑结构.因为一些常用的表情是由一组肌肉按某种协调的方式运动产生的,Reeves 提出了一种通过高层的宏肌肉控制低层肌肉的方法.宏肌肉由一系列低层的肌肉组成,每一块低层的肌肉赋以权,宏肌肉收缩引起低层肌肉按某种加权形式收缩.

5　基于物理模型的动画技术

基于物理模型的动画技术是 80 年代后期发展起来的一种新技术.尽管该技术比传统动画技术的计算复杂度要高得多,但它能逼真地模拟各种自然物理现象,这是基于几何的传统动画生成技术所无法比拟的.基于物理模型的动画技术考虑了物体在真实世界中的属性,如它具有质量、转动惯矩、弹性、摩擦力等,并采用动力学原理来自动产生物体的运动.当场景中的物体受到外力作用时,牛顿力学中的标准动力学方程可用来自动生成物体在各个时间点的位置、方向及其形状.此时,动画师不必关心物体运动过程的细节,只需确定物体运动所需的一些物理属性及一些约束关系,如质量、外力等.

在刚体运动模拟方面,研究重点主要集中在采用牛顿动力学的各种方程来模拟刚体系统的运动.由于在真实的刚体运动中任意两个刚体不会相互贯穿,因而在运动过程模拟时,必须进行碰撞检测和碰撞响应.Hahn 采用解析方法来计算两刚体碰撞时产生的冲量.[57]该方法假定两刚体在接触的瞬间只有一点接触,因而是非常理想化的.为防止非完全弹性碰撞时刚体间的相互贯穿,Hahn 将这种碰撞接触模拟为一个屡次发生碰撞的序列.Moore 将瞬时碰撞模拟为一个很小间隔的单碰撞的序列[58],并用非解析方法来处理刚体间的非完全弹性碰撞问题.对碰撞响应问题,他们则采用一具有常数弹性系数的弹簧来加以模拟.虽然,上述两种碰撞模型非常适合于避免景物在运动过程中的相互贯穿现象,但它却不能有效地计算非完全弹性碰撞时所产生的力.注意到上述模型的这一缺陷,Baraff 提出了一个解析计算非完全弹性刚体系统碰撞产生的冲力的方法.[59]该模型允许两刚体在多点接触碰撞,多面体间碰撞冲力的计算则采用线性规划方法.在连续几篇文章中,他将上述算法分别拓广到具有曲面的一般性场景中,还考虑了两物体碰撞滚动时产生摩擦力的情况.对于刚体物体,Baraff 提出了一个计算包含摩擦力在内的碰撞力的方法,由于并非转换成优化问题,因而更简单、可靠、速度更快.[60]刚体碰撞的另一问题为碰撞检测.Hahn 采用层次包围盒技术来加速多面体场景的碰撞检测.[57]Moore 则提出了 2 个有效的碰撞检测算法,其一用来处理三角剖分过的物体表面,而另一算法则用来处理多面体环境的碰撞检测.[58]由于任一物体表面均可表示成一系列三角面片,因而该碰撞检测算法具有普遍性.该算法的缺点是当景物为一复杂的雕塑曲面时,三角剖分可能产生大量的三角片,这会大大影响算法的效率.为此,

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn

Baraff,Herzen 等人提出了基于参数曲面的几何碰撞检测算法. Baraff 将两刚体的碰撞检测转化为一隐式约束方程,由此可方便地决定两刚体是否相碰.[59]而 Herzen 等则数值求解两参数曲面在接触点处或最近点处的参数值来判定它们是否相交并应用层次细分技术.[61]

在真实物理世界中,许多物体并非完全是刚体,它们在运动过程中会产生一定的形变. 基于几何的变形由于是人为给定的,因而变形过程缺乏真实性. 1986 年,Weil 首次将基于物理模型的柔性物体引入到计算机动画中.[37]Miller 用质点一弹簧系统模拟了蛇和虫子这类无腿动物的蠕动动画.[62]Tu 等人提出了一种模拟鱼的行为的动画[63],动画师能以尽少干涉的情况下生成真实的个体和群体运动. Terzopoulos 等采用连续弹性理论来模拟物体的形状和运动.[38]通过考虑物体的分布式物理属性,如质量、弹性等,他们成功地模拟了柔性物体对外力的动力学响应. 为了生成逼真的运动,Platt 等人提出了柔性物体的 2 种约束方法.[64]反应约束允许多边形柔性模型碰撞的快速计算,并允许动画师进行推拉控制. 扩充的拉格朗日约束允许生成诸如体积不变的压扁和太妃糖类物质的挤压效果. 在仿真具有柔性物体的复杂系统时,若把其几何和动力学分开讨论,则问题将会简化. Pentland 提出用振动模式来描述物体的动力学,用体积模式来描述物体的几何,然后用多项式变形映射将它们合在一起.[65]采用这种混合的表示,其效率可比一般的非刚体逆动力学问题提高 2～3 个数量级. 在自然景物的动画模拟中,随机方法是非常有效的. Shinya 基于随机过程和物理学原理提出一个自然景物在风影响下的随机运动模型.[66]玻璃和陶瓷类物体的破裂模拟是动画中的一个复杂问题,Norton 等人提出了一个基于三维质点表示的破裂动画模拟方法.[67]Kass 基于流体动力学模拟了水流[68].

尽管基于物理模型的动画技术可生成非常自然、逼真的动画,但它有以下几方面的局限性:①模拟难以建立. 目前的模型和算法大部分是针对特殊场景而设计的,缺乏普遍性;②模拟过程难以控制. 由于运动过程由模型自动控制产生,致使用户无法参与控制他所需要的结果,用户只能通过间接地设置一个抽象参数来调节,缺乏直观性;③模拟缓慢. 由于求解物理模型采用数值计算,因而计算量非常大.

目前,计算机动画已进入实用阶段,国际上涌现了许多优秀的动画软件. 用于图形工作站上成熟的商品化动画软件主要有美国的 WAVEFRONT、加拿大的 SOFTIMAGE 和 ALIAS、法国的 TDI 等;用于微机上的有 3D STUDIO. 一些动画领域新的研究成果得到了迅速的应用. 如粒子系统、群体运动、FFD 变形技术、动力学模型、关节运动、二维 morphing 技术等都可从这些优秀软件中见到. 这些动画软件由于各自的特色和优势,都拥有广阔的市场,并都在不断推陈出新,逐步完善和改进. 近几年,浙江大学、北方工业大学、中国科学院软件研究所等单位相继从国外引进了商用动画软件,并在电视片头、动画广告设计方面取得了很好的成效. 浙江大学用 ALIAS 和 SOFTIMAGE 软件进行古兵马俑的动画设计,中国科学院软件研究所利用 TDI 的 Explore 软件设计了第 11 届北京亚运会片头,北方工业大学在齐东旭教授的主持下研制了我国第一部全部用计算机编程制作的科教电影片《相似》.

计算机动画的内容多,范围广,发展很快,是一个很有前景的研究方向,许多问题还有待于进一步的探索. 由于篇幅有限,本文的综述不可能包括动画的所有内容,有兴趣的读者可进一步参考相应的文献.[20]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

参考文献

1 Guenter B, Parent R. Computing the arc length of parametric curves. IEEE Computer Graphics & Applications, 1990,**10(3)**:72～78.

2 Watt A, Watt M. Advanced animation and rendering techniques. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.

3 Steketee S N, Badler N I. Parametric keyframe interpolation incorporating kinetic adjustment and phrasing control. Computer Graphics,1985,**19(3)**:255～262.

4 Kochanek D H U, Bartels R H. Interpolating splines with local tension, continuity and bias control. Computer Graphics, 1984,**18(3)**:245～254.

5 Shoemake K. Animating rotation with quaternion curves. Computer Graphics, 1985,**19(3)**:245～254.

6 Barr A H, Currin B, Gabriel S. Smooth interpolation of orientations with angular velocity constraints using quaternions. Computer Graphics, 1992,**26(2)**:313～320.

7 Kim M J, Kim M S, Shin Y S. A general construction scheme for unit quaternion curves with simple high order derivatives. Computer Graphics, 1995,**29(3)**:369～376.

8 Forsey D R, Bartels R H. Hierarchical B-spline refinement. Computer Graphics, 1988,**22(4)**:205～212.

9 Barr A H. Global and local deformations of solid primitives. Computer Graphics, 1984,**18(3)**:21～30.

10 金小刚,鲍虎军,彭群生. 一种新的基于 factor curve 的变形控制方法. 软件学报,1996,**7(9)**:537～541.

11 Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models. Computer Graphics, 1986,**20(4)**:151～160.

12 Coquillart S. Extended free-form deformations: a sculpturing tool for 3D geometric modeling. Computer Graphics, 1990,**24(4)**:187～196.

13 Lamousin H J, Waggenspack W N. NURBS-based free-form deformations. IEEE Computer Graphics & Applications, 1994,**14(9)**:59～65.

14 Ruprecht D, Nagel R, Muller H. Spatial free-form deformation with scattered data interpolation. Computers & Graphics, 1995,**19(1)**:63～71.

15 Borrel P, Rappoport A. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. ACM Transactions on Graphics, 1994,**13(2)**:137～155.

16 Hsu W M, Hughes J F, Kaufmann H. Direct manipulation on free-form deformation. Computer Graphics, 1992,**26(2)**:177～184.

17 Coquillart S, Jancene P. Animated free form deformation: an interactive animation technique. Computer Graphics, 1991,**25(4)**:23～27.

18 Lazarus F, Coquillart S, Jancene P. Axial deformations: an intuitive deformation technique. Computer Aided Design, 1994,**26(8)**:607～612.

19 Chang Y K, Rockwood A P. A generalized de Casteljau approach to 3D free-form deformation. Computer Graphics, 1994,**28(3)**:257～260.

20 金小刚. 计算机动画基础算法研究[博士论文]. 浙江大学,1995.

21 Wolberg G. Digital image warping. IEEE Computer Society Press, 1990.

22 Beier T, Neely S. Feature-based image metamorphosis. Computer Graphics, 1992,**26(2)**:35～42.

23 Litwinowicz P, Willams L. Animating images with drawings. Computer Graphics, 1994,**28(3)**:409～412.

24 Sederberg T W, Greenwood E. A physically based approach to 2-D shape blending. Computer Graphics, 1992,**26(2)**:25～34.

25 Sederberg T W, Gao P S, Wang G J. 2-D shape blending: an intrinsic solution to the vertex path problem. Computer Graphics, 1993,**27(3)**:15～18.

26 Chen E, Parent R. Shape averaging and its applications to industrial design. IEEE Computer Graphics & Applications, 1989,**9(1)**:47～51.

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn

27 Payne B, Togo A. Distance field manipulation of surface models. IEEE Computer Graphics & Applications, 1992, **12(1)**:65～71.

28 Kent J R, Carlson W E, Parent R E. Shape transformation for polyhedral objects. Computer Graphics, 1992, **26(2)**:47～54.

29 Lerios A, Garfinkle C D, Levoy, M. Feature-based volume metamorphosis. Computer Graphics, 1995, **29(3)**: 449～456.

30 Nishimura H, Hirai M, Kawai T. Object modeling by distribution function and a method of image generation. Trans. IECE, 1985, **68-D(4)**:718～725.

31 Nishita T, Nakamae E. A method for displaying metaballs by using Bezier clipping. Computer Graphics Forum, 1994, **13(3)**:271～280.

32 Desbrun M, Gascuel M P. Animating soft substance with implicit surfaces. Computer Graphics, 1995, **29(3)**:287～290.

33 Reeves W T. Particle systems——a technique for modeling a class of fuzzy objects. Computer Graphics, 1983, **17(3)**:359～376.

34 Reeves W T, Blau R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. Computer Graphics, 1985, **19(3)**:313～322.

35 Reed T, Wyvil B. Visual simulation of lighting. Computer Graphics, 1994, **28(3)**:359～364.

36 Reynolds C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. Computer Graphics, 1987, **21(4)**:25～34.

37 Weil J. The synthesis of cloth objects. Computer Graphics, 1986, **20(3)**:49～54.

38 Terzopoulos D, Platt J, Barr A. Elastically deformable models. Computer Graphics, 1987, **21(4)**:205～214.

39 Carigan M, Yang Y, Thalmann N M. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. Computer Graphics, 1992, **26(2)**:99～104.

40 Breen D E, House D H, Getto P H. A physically-based particle model of woven cloth. The Visual Computer, 1992, **8(5)**:264～277.

41 Breen D E, House D H, Wonzy M J. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. Computer Graphics, 1994, **28(3)**:365～372.

42 Witkin A, Popovic Z. Motion warping. Computer Graphics, 1995, **29(3)**:105～108.

43 Girard M, Maciejewski A A. Computational modeling for the computer animation of legged figures. Computer Graphics, 1985, **19(3)**:263～270.

44 Girard M. Interactive design of 3D computer-animated legged animal motion. IEEE Computer Graphics & Applications, 1987, **7(6)**:39～51.

45 Badler N I, Manoochehri K H, Walters G. Articulated figure positioning by multiple constraints. IEEE Computer Graphics & Applications, 1987, **7(6)**:28～38.

46 Isaacs P M, Cohen M F. Controlling dyamics simulation with kinematic constraints, behavior functions and inverse dynamics. Computer Graphics, 1987, **21(4)**:215～224.

47 Wilhelms J. Using dynamics analysis for animation of articulated bodies. IEEE Computer Graphics & Applications, 1987, **7(6)**:12～27.

48 Wilhelms J. Towards automatic motion control. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, **7(4)**:11～22.

49 Armstrong W W, Green M W. The dynamics of articulated rigid bodies for purposes of animation. The Visual Computer, 1985, **4(1)**:231～240.

50 Witkin A, Kass M. Spacetime constraints. Computer Graphics, 1988, **22(4)**:159～168.

51 Zeltzer D. Motor control techniques for figure animation. IEEE Computer Graphics & Applications, 1982, **2(9)**: 53～59.

52 Bruderlin A, Calvert T W. Goal-directed, dynamics animation of human walking. Computer Graphics, 1989, **23**

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(3):233～242.

53 Boulic R, Thalmann N M, Thalmann D. A global human walking model with real-time kinematic personification. The Visual Computer, 1992,**6**(6):344～358.

54 Cohen M F. Interactive spacetime control for animation. Computer Graphics, 1992,**26**(2):293～302.

55 Liu Z, Gortler S J, Cohen M F. Hierarchical spacetime control. Computer Graphics, 1994,**29**(4):35～42.

56 Waters K. A muscle model for animating three-dimensional facial expression. Computer Graphics, 1987,**21**(4):17～24.

57 Hahn J K. Realistic animation of rigid bodies. Computer Graphics, 1988,**22**(4):299～308.

58 Moore M, Wilhelms J. Collision detection and response for computer animation. Computer Graphics, 1988,**22**(4):289～298.

59 Baraff D. Analytical methods for dynamics simulation of non-penetrating rigid bodies. Computer Graphics, 1989,**23**(3):223～232.

60 Baraff D. Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies. Computer Graphics, 1994,**29**(4):23～34.

61 Herzen B U, Barr A H, Zatz H R. Geometric collisions for time-dependent parametric surfaces. Computer Graphics, 1990,**24**(4):39～48.

62 Miller G. The motion dynamics of snakes and worms. Computer Graphics, 1988,**22**(4):169～173.

63 Tu X, Terzopoulos D. Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behaviour. Computer Graphics, 1994,**29**(4):43～50.

64 Platt J C, Barr A H. Constraint method for flexible models. Computer Graphics, 1988,**22**(4):279～288.

65 Pentland A, Williams J. Good vibrations: modal dynamics for graphics and animation. Computer Graphics, 1989,**23**(3):215～222.

66 Shinya M, Fournier A. Stochastic motion-motion under the influence of wind. Computer Graphics Forum, 1992,**11**(3):119～128.

67 Norton A, Turk G, Bacon, B. Animation of fracture by physical modeling. The Visual Computer, 1991,**7**(4):210～219.

68 Kass M, Miller G. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. Computer Graphics, 1990,**24**(4):49～57.

A SURVEY OF COMPUTER ANIMATION

JIN Xiaogang　BAO Hujun　PENG Qunsheng

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

Abstract　This paper gives a systematic survey of computer animation techniques. The survey is divided into keyframe animation, soft object animation, procedural animation, articulated animation and human animation, physically based animation.

Key words　Keyframe animation, soft object animation, procedural animation, articulated animation, human animation.

Class number　TP391

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn