

物体渐变技术现状与发展

李 华 朱光喜 朱耀庭

(华中科技大学电信系图象教研室, 图象信息处理与智能控制国家教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 物体渐变技术在虚拟现实、工业模拟、科学计算可视化、动画生成等领域有着广泛的应用, 具有十分重要的意义. 近年来, 有许多研究者提出了一些效果不错的算法, 对这些算法进行了分析, 并对物体渐变的基本原理、物体的表示方法与渐变技术间的紧密联系、二维物体渐变技术和三维物体渐变技术做了较全面的综述, 探讨了现有物体渐变技术中需要改进的关键问题, 并给出了渐变技术在未来的发展方向.

关键词 物体渐变 形状变换 匹配 插值 几何模型

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)08-0745-07

A Survey of Object Metamorphosis

LI Hua, ZHU Guang-xi, ZHU Yao-ting

(State Education Commission Laboratory for Image Processing and Intelligent Control,

Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A metamorphosis or a morphing is the process of continuously transformation one object into another, which is widely studied in graphics, simulation, animation and virtual reality technologies etc., and has great signification. Many metamorphosis techniques have been proposed in recent years for 2D or 3D objects. An almost comprehensive survey of the different approaches of object metamorphosis is presented in this paper. Study and development of metamorphosis problem is given in the field of the metamorphosis principle, 2D metamorphosis and 3D metamorphosis technologies, especially the technologies based on mathematical morphology. The final section analyzes the key points and the prospects of object metamorphosis, which lead to the important problems to be considered and solved.

Keywords Metamorphosis, Shape transformation, Correspondence, Interpolation, Geometric modeling

0 引 言

近年来, 渐变技术广泛应用于 CAD 和计算机动画系统中, 成功地模拟了许多影视特技效果. 随着信息社会的发展, 虚拟现实、工业模拟、科学计算可视化、动画生成等领域对渐变技术提出了更为迫切的要求. 物体渐变, 顾名思义就是采用某种方法使初始物体在视觉上连续变化到目标物体. 研究者所要做的工作就是设计中间渐变过程, 以实现平滑、自然地渐变^[1-2]. 如在动画设计中, 给出一定数目的关键

帧, 通过渐变方法内插出中间帧, 实现连续动画效果; 或是通过从初始物体到目标物体的渐变生成一些新的、融合了两个物体特性的特殊物体等等. 渐变技术被广泛应用于字体生成、曲面造型、肌肉运动描述等诸多领域. 显而易见, 对两个给定的物体而言, 从其中一个渐变到另一个可以有无穷多种情况, 但令人满意的渐变则应满足以下 3 个条件: 一是渐变过程中产生的中间状态应保持单调平滑的变换; 二是中间状态的边界曲面应尽量保持光滑; 三是初始物体和目标物体所共有的一些特征在渐变过程中应该被保留. 因此令人满意的渐变应该是平滑的, 在渐

基金项目: 国家自然科学基金(69973018), 湖北省自然科学基金(99J009)

收稿日期: 2001-03-05; 改回日期: 2001-07-18

变过程中尽量体现出初始物体特征的渐渐消失和目标物体特征的逐步凸现,且无其他无关特征的出现,即不出现病态的中间状态.图1所示为一种效果较好的典型渐变过程,其满足上述的3个条件.



图1 主观评价较好的物体渐变一般过程

这里所说的物体包括二维图象、多边形、二维曲线、三维曲线、多面体等.物体的表示方法是选择合适渐变技术的前提,因此,在二维或三维空间中,针对物体的不同表示方法,渐变技术也是不同的.物体表示方法的多样性和渐变技术的复杂性吸引了不少国内外研究者在这方面进行研究,促进了该技术的快速发展.

1 物体渐变基本原理

物体渐变方法和物体的表示方法有着密切的关系,图象、三维体元、多边形、多面体的渐变方法各不相同,但其基本方法或者说是实现渐变的基本思路是一致的,其过程包括匹配映射和插值.

一般来说,由于被变物体不是规则形状,且物体之间差异较大,对物体进行整体渐变不仅运算量大,而且在细节处的渐变效果也不好,所以往往是将两个物体分别分解为多个子集,再对初始物体中的子集与目标物体中的子集建立对应变换关系,即认为初始物体中的某一子集应对应变换到目标物体的某一子集,为一一对应关系.通常这一步被称作映射或匹配,而且一般需要人工参与.对应关系适当与否,对渐变质量的好坏有着至关重要的影响.当然,人工不可能对所有的部分都指定对应关系,而只是对一些关键部分指定对应关系,其余部分的对应变换则采用一定的数学工具来实现.

建立对应关系之后,所要做的就是插值,即将初始物体的各部分(包括顶点、边、面、体元等)随时间自然变换到对应部分所在的位置,并符合目标物体各部分的邻接关系.这一步也称为形状融合.对应关键点的变换路径决定了中间插值的平滑性和自然性,若变换路径不恰当,就可能出现中间插值的自交现象或是引入一些不希望出现的特征,产生病态的

渐变.

以上两步可以说是渐变的基本思路,渐变过程可以用一个统一的数学公式来进行描述.设初始物体为 A , 目标物体为 B , 在由 A 到 B 的渐变中产生的中间插值为 C , 则

$$C = f(t)A \Delta g(t)B$$

其中, $f(t)$, $g(t)$ 是随时间 t 变化的函数. Δ 表示 A 和 B 之间的插值变换.

就各种不同方法而言,某些步骤可能比较复杂也可能比较简单,如某些基于体元表示法的简单同构物体渐变,将物体作为整体考虑,就只需进行顶点间的简单匹配,然后再采用一定的插值方法就可以了,也有将物体变换到频域进行处理的,这就增加了时域、频域转换的工作.无论采用哪种方法,其目标都是一样的,就是实现平滑、自然的渐变.

2 二维物体渐变技术

早期的物体渐变技术研究主要集中在二维物体的渐变.这类算法是基于光栅图象^[3]和矢量表示或几何表示的图象^[4,5].Beier 和 Neely 提出的寻找对应控制点,采用线性插值获取中间状态的方法是早期算法中较好的一种^[3].后期的研究工作主要有文献^[6]和文献^[7]提出的方法.图象渐变通常也被称为图象的自交融合(Cross-dissolving),是通过原始图象和目标图象对应像素灰度值的融合来描述渐变过程.

二维图形变形技术的研究主要集中在如何建立映射函数上.基于特征表示的渐变主要是通过交互确定一些相应的特征点对或线段对来建立两个物体之间的对应关系(变形函数),中间状态经插值对应的部分而得到.二维渐变方法可以分为基于形状渐变和基于骨架渐变两种.

基于形状渐变可以分为直接和间接两种方法.直接方式就是直接对形状进行变换,如 Burtnyk 和 Wein^[8]提出的简单线性插值法 CCLI (Cartesian Coordinate Linear Interpolation); Reeves^[9]提出的基于控制点渐变方法;Sederberg 和 Greenwood 提出的顶点映射方法^[4];Sederberg^[5]提出的基于顶点变换的 PCLI (Polar Coordinates based Linear Interpolation)渐变方法;Sun 对 Sederberg 算法的改进^[10];Cohen-or 提出的基于 DFI (Distance Field Interpolation)插值,通过多边形边界融合实现渐变

的方法^[11-12]等.上述算法都可归结为二维形状混合(2D Shape Blending)技术,其原理是将被变形物体和目标物体相互重叠,通过初始物体的渐渐消失和目标物体的逐步凸现来重建一系列的中间状态.

间接渐变方法是先将形状变换为某种表示方法,然后通过改变其参数表示来重建物体形状,实现渐变的目的.如Goldstein和Gotsman^[13]利用图形的多分辨率表示来实现渐变.间接渐变的原理在三维渐变方法中有着较为广泛的应用.这一类方法不是将多面体作为点面的集合来考虑,而是将顶点、边长、夹角之间的关系用图来表示,然后通过改变点、线、面之间的关系来实现对物体的渐变.这类方法原理简单,对于简单形状渐变效果较好,但当两个形状的重合部分不是很多时,中间状态可能出现病态现象.

基于骨架的渐变方法是先提取出物体的骨架,然后通过对骨架的改变实现对形状的渐变.如Burtnyk和Wein提出的交互式骨架技术^[14],Shapira和Rappoport利用连通骨架控制多边形的边界以解决顶点变换路径问题^[15]等.

在二维图象渐变技术中,渐变的中间过程得到的仍然是图象.由于不涉及三维几何信息,生成的中间画面往往不够真实,因此,在许多计算机动画和设计中,若想对图象进行渐变,往往是对其中目标物体对应的三维模型进行变换,而不是直接对图象进行变换,这是因为当观察视点和角度变换时,二维图象就必须重新计算.尽管View morphing技术^[16]通过将摄像机变换引入到传统二维渐变技术来解决这一问题,但仍无法完全克服这一缺点.从另一方面来讲,由于三维模型独立于视点和光照影响,采用三维模型表示法可以利用许多计算机动画设计中的技术,因此最彻底的解决方法是采用三维变形技术.与二维变形技术相比,在两个具有不同拓扑结构的三维景物之间建立自然的形状过渡是非常困难的,但也因此有越来越多的研究者将注意力集中在三维渐变技术的研究上.

3 三维物体渐变技术

三维物体表示法在计算机中的应用日益广泛,而且三维渐变效果也具有更强的真实性,因此,近年来,三维物体渐变技术受到了越来越多研究者的重视,并得到了很大的发展.三维物体的表示大致可分

为基于体元的表示法(Volume-Based)和基于边界形状的表示法(Boundary-Based)两类.基于不同的物体表示,三维渐变技术也可以分为基于体元和基于边界两类.

3.1 基于体元表示的三维渐变技术

基于体元的方法对物体渐变函数的形式限制较少,而且连续渐变函数一般都可产生平滑的效果.前面提到的二维间接渐变方法在三维中得到了广泛的应用.对于拓扑结构不一致的物体,Hughes提出了三维Fourier变换的方法^[17],其先把物体变换到频谱空间,对低频系数进行内插,同时逐步加入高频系数,从而尽可能地减少由高频分量引入的误差,最后再利用反变换回到物体空间,以实现物体渐变.这种方法的实质是通过高频分量和低频分量的分离将物体的粗轮廓和形状细节分开来进行考虑.He则利用小波变换取代傅立叶变换重新研究了这一问题^[18].这两种方法都是对空间域的采样数据进行处理,其优点就在于简单、易行、利用频域特性来解决问题,但不能对渐变过程进行人工干预,而且都很耗时,对于大小为 n^3 的物体,计算每个中间插值的复杂度分别为 $O(n^3 \log n)$ ^[17]和 $O(n^3)$ ^[18].

Lerios在Beier和Neely提出的二维图象算法^[3]的基础上,给出了一种三维物体渐变的算法^[19].该方法首先将物体纳入一定的参数空间,对两渐变物体进行弯曲(Warping),进行旋转或平移等变换,然后再对弯曲过后的物体由用户人工对点、线、面进行最优匹配映射和插值来达到渐变目的.对体元表示的物体,该方法简单易行,但参与计算的数据量较大,时间花费也较长,中间插值形状会出现模糊.

近年来,基于DFI的物体渐变方法可以说是渐变技术中效果最好的一种,取得了令人满意的成果.DFI由Levin在1986年首次提出,并进行了分析^[20],且应用于图象重建中.DFI是一种由多个 $N-1$ 维类似物体剖面形状重建 N 维物体模型的集合值内插,是通过抽取所生成标量场的等值面来实现物体造型,特别是可通过交互修改各个元素进行局部修正,进而生成光滑的复杂形状,实现物体之间的渐变.随后,Herman将DFI方法成功地应用于三维生物医学图象的重建中^[21];Payne和Toga^[22]给出了三维生物医学物体的DFV(Distance Field Volumetric)表示方法.但他们的方法不对初始物体和目标物体进行弯曲,也不建立他们之间的对应关系,因此无法对整个渐变过程实施人工干预,可能产

生不理想的渐变结果。

为了改进上述基于DFI方法的缺点, Cohen提出了一种改进DFI方法^[23]。该方法首先对物体进行体元分解, 然后通过选取匹配控制点来定义弯曲函数(Warping Function), 以实现面的渐变。弯曲函数分解为刚体部分和弹性部分来独立进行计算, 以减少插值模型的扭曲。刚体渐变函数决定了物体整体形状上的改变, 控制了整个渐变过程中物体的形状; 弹性渐变函数则决定物体细节上的渐变。该方法中, 选取匹配控制点的工作需要人工完成, 当两物体拓扑结构差别较大时, 就会非常复杂, 这可以说是该方法的一个不足之处, 但该方法可以提供直观、简单的人工控制, 且不需要在对应的渐变物体之间建立匹配对应关系, 而且被渐变物体和目标物体可以具有不同的拓扑结构, 这就大大提高了该方法的适用性。该方法最大的优点在于提供了一种自然、平滑的渐变过程, 可以说, 它是近年来最令人满意的一种渐变方法。图2所示即为DFI方法的渐变效果。

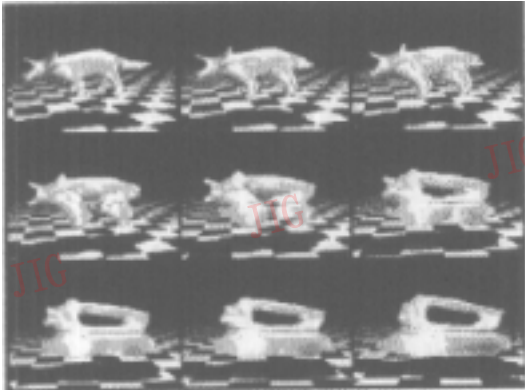


图2 文献[21]中给出的三维物体渐变效果

国内也有一些研究者开展了这方面的研究工作, 文献[24]中提出了一种交互三维渐变技术; 文献[25]中提出了一种基于任意骨架的隐式曲面造型技术, 该方法突破了传统隐式曲面以点为基本骨架的限制, 而以任意骨架作为基本体元, 通过距离函数来逼近原始骨架的形状。

3.2 基于边界表示的三维渐变技术

上面所介绍的一些方法都是考虑被渐变物体的整体, 而对于一般物体而言, 形状特征是最重要的, 有相当多的物体是以其边界形状来表示的, 因此渐变方法中的另一大类就是基于边界表示的方法, 这类方法首先考虑的是物体边界形状的渐变, 故参与

渐变的数据量比考虑整体时的数据量少得多, 这就可以大大提高渐变的速率, 而其他一些如色彩、纹理等物体特征的变换和形状也有着密切的联系。类似, 基于形状的渐变方法也包括了匹配和插值两部分, 由于是以形状表示物体, 所以这类方法是通过计算两个物体拓扑结构的对应关系来实现的, 即首先对两个物体分别建立一个描述物体拓扑结构的点、线、面关系的图表, 然后建立两个图表间的对应关系, 利用插值实现渐变。

最早的与形状有关的方法是在两个不同物体的控制点之间定义一个映射关系, 利用内插得到中间物体。对于有相同拓扑结构和同等顶点数目的物体, 三维渐变就是简单的顶点之间的内插^[26]; 对于顶点数不同的物体, 一般先通过球形变换或柱形变换得到相同的顶点数, 再进行内插以得到中间状态。这类方法虽然简单, 但易引起渐变失真, 如Bethel和Uselton提出一种渐变方法^[27], 只对两个物体的拓扑结构关系进行匹配而没有考虑其几何结构, 这样就可能将在初始物体中相邻的两点映射为目标物体中相距非常远的两点, 从而引起渐变的失真。

Kent等人提出了一种零亏格多面体间的形状过渡算法^[28,29], 该算法通过将原始模型同时投影到一中间球面上来实现其拓扑合并, 得到具有与原模型相同形状但有不同顶点数的中间模型。这类渐变方法适用于星形的多面体渐变, 人工交互性较好, 当顶点数为 n 时, 寻找中心点的复杂度为 $O(n)$ 。因为产生的中间模型有相同的拓扑结构, 所以它们之间的映射关系很容易得到, 但由于其星状投影模式, 这一算法不能处理一般情形, 如非零亏格情形。

Parent提出利用递归过程来划分网格, 对对应顶点之间采用线性插值的渐变方法^[30]。这类方法适合于球状物体的渐变, 可以自动划分网格也可人工完成, 但由于顶点之间是线性插值, 渐变结果不是很平滑。

Lazarus等人将Kent的方法应用于基于轴线的放射状物体的渐变^[31,32], 这类物体的一个共同特征就是可以定出一条中心轴线来。该方法首先对初始物体和目标物体分别建立对应的网格结构, 并保留物体的特征, 插值过程包括对两条三维中心轴线的插值和以轴线上的点为中心点对每个网格采样点的径向插值。这类方法对于顶点的插值采用的是非线性方法, 用户可以控制轴的渐变, 交互性也较好, 适用于基于轴线物体的渐变, 但判断物体是否为基

于轴的发散物体以及确定具体的三维轴线比较复杂,图 3 所示就是 Lazarus 提出的基于轴渐变方法的渐变效果.



图 3 Lazarus 提出的基于轴渐变方法的渐变效果

DeCarlo 对不同拓扑结构物体间的渐变进行了尝试^[33],对物体的每个平面实行单独控制,拓扑结构变化的部分利用退化平面来处理.这种方法的优点在于可以处理不同拓扑结构物体的渐变,但要求操作者对拓扑知识较熟悉,而且该方法对复杂物体的渐变效果也不是很令人满意.Gregory 提出的方法^[34]和 DeCarlo 的方法比较类似;文献^[35]给出了一种对顶点进行分解合并,以实现三维物体渐变的方法;文献^[36]给出了一种基于特征的表面分解算法,这两种方法都是对分解得到的结构建立对应映射关系,以实现物体间的渐变.

上述各种方法都具有不同的优点,可以对物体的渐变进行细微的控制,但各种算法都只是适用于某一类形状的物体,适用范围窄,且在人工交互性、费时性等方面也不同;都没有在实质上解决拓扑关系不一致的物体渐变的统一描述;用户仅仅通过交互地拉动物体的顶点或者采用对其施加变换的方法改变物体的几何形状,所产生的效果是有限的,用它们难以得到复杂的形状;当顶点或控制顶点的数目较多时,这种直接操作方式就显得十分繁琐.这些方法一般只适用于同态拓扑结构物体间的渐变,并没有从根本上解决非同态物体间的渐变问题,从而限制了方法的应用范围.

在此值得一提的是基于形态学的渐变方法,形态学理论至今已发展了 20 年,是一门较成熟的数学理论.形态学的非线性对于处理物体的渐变有着极大的优越性.物体渐变过程的中间状态必须具有初始物体和目标物体的几何特征,这样才能满足平滑变换的特点.考虑到形态和算子具有融合两物体几何特征的性质,用形态和描述物体渐变可以得到很好的效果,并且基于形态学的非同构物体变换较好地描述了自然界中的渐变过程,经过不断执行形态

变换算法,将一个形态变到另一个形态的过程最接近自然的渐变过程,这是由于形态算子是一种全局算子,可以不断地增加和减少点、边、面去逼近另一物体,通过凸分解可以解决渐变过程中的病态问题.形态运算具有升维性质,三维实体易于用二维图形甚至一维线段表示,使得形状描述非常简洁.形态算子是欧氏空间中定义的矢量运算,本身具有几何、拓扑特性,因而比集合算子更适合于描述实体渐变及建模.

Anil kaul 把形态学的方法引入到三维物体的渐变,提出了基于形态和的插值方法.设初始物体为 A ,目标物体为 B ,则渐变体 $C(r) = (1-r)A \oplus rB$, $r \in [0, 1]$.这种方法不需要在 A 和 B 之间建立匹配对应关系. A 和 B 形态和的边界是 A 的边界和 B 的边界的形态和的子集^[37].这部分工作曾在 EUROGRAPHICS'91 会议上获奖,对于解决凸多面体的渐变非常有效. Kaul 和 Rossignac 还进一步将形态和与 Bezier 公式相结合,以产生多面体渐变过程的中间插值^[38].对于凸体的渐变而言,这一类方法是非常行之有效的,但对于非凸体的渐变而言,这一方法会产生病态结果,中间态并非是预想的结果.原因是形态和是一种膨胀算子,它通常是先把凹多面体变成凸多面体,然后再变回凹多面体,所以达不到实用的要求.图 4 所示即为凹体渐变的病态结果.文献^[39]、^[40]中也是利用形态和来实现物体的渐变,但仍是只对凸体有效,对于凹体渐变的病态问题仍没有很好解决.凹体渐变的病态问题成了阻碍形态学解决物体渐变的拦路虎.

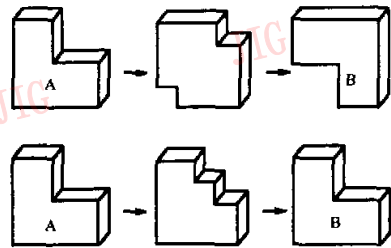


图 4 利用形态和方法由凹体 A 渐变到凹体 B 时产生的病态结果

针对此种情况,刘文子等提出了广义形态变换的概念,即对任意物体进行凸分解,把多面体或曲面分解成为子凸集,并按某种最近距离准则建立各子凸集间的匹配关系;对各子凸集间的凸变形进行合并,以达到自然渐变的结果;并由匹配的一致性准则

进行匹配结果的检验,解决凹体渐变的病态问题^[41]。广义形态变换方法在将形态学应用于物体渐变方面做了很好的尝试,显示出广阔的应用前景,图5即为采用广义形态变换方法得到的物体渐变结果,从图中可以看出,该渐变结果自然、平滑。由此可以看出,只要解决了形态学方法的瓶颈问题,就可以实现良好的渐变。

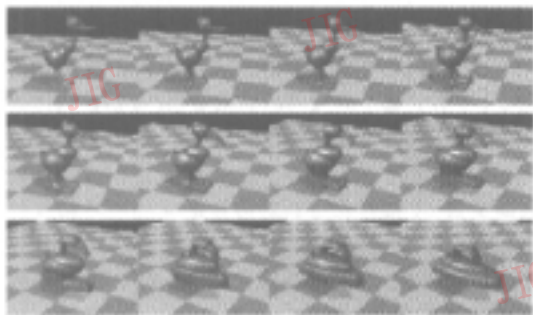


图5 基于广义形态变换的非同态物体变形结果

4 结 论

本文对物体渐变技术的发展做了简单的总结,指出变形原理、方法、人工干预程度和物体的表示方法是密切相关的,对具有代表性的算法做了简要的评价,指出各种算法的适用条件,以及它们各自的优缺点。可以看出,现有的物体渐变方法各有优缺点,且对于非同态物体间的渐变至今仍没有十分令人满意的方法。现有渐变技术中存在的一些不足之处主要表现在:

(1) 基于物体整体的渐变技术对复杂的、不同拓扑结构的物体渐变具有较好的效果,但存在着一些限制,如自动方法,由于没有人工干预,不能控制渐变过程中的映射和匹配,得到的结果不是很理想。

(2) 基于形状的渐变方法,一般都需要人工进行匹配阶段的工作,完全自动的方法不能产生令人满意的渐变效果。在限定被变形物体的形状,并增加一些人工干预的情况下,某些方法才可以获得令人满意的结果。

渐变技术的主要发展方向在于:

(1) 应主要解决非凸体的渐变问题。Cohen-or 提出的方法取得了目前为止效果最好的渐变,但当被变形物体和目标物体非同拓扑结构时,就过于繁琐了。

(2) 当目标物体和初始物体非同构时,寻找它们之间合适的对应关系直接影响了渐变的质量,而插值方法的不同也决定了渐变的平滑性和自然。因此匹配映射和插值方法的好坏是提高变形质量的关键,非线性插值方法的研究应是渐变技术的重要研究方向。

(3) 引言部分指出了评价变形质量好坏的3个标准,可以看出,这些标准是以观察者的主观判断为基础的,并没有给出客观判断的准则和方法。因此在今后的工作中,如何制定评价变形质量的客观标准也是值得研究的课题。

参 考 文 献

- 1 Sederberg T, Parry S. Free-form deformation of solid geometric models[J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'86), 1986,20(4): 537~541.
- 2 Sorensen P. Morphing Magic[J]. Computer Graphics World, 1992,11(1):36~42.
- 3 Beier T, Neely S. Feature-based image metamorphosis [J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'92), 1992,26(2):35~42.
- 4 Sderberg T W, Greenwood E. A physically based approach to 2D shape blending[J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'92), 1992,26(2):25~34.
- 5 Sederberg T W, Gao P, Wang G *et al.* 2D shape blending: An intrinsic solution to the vertex path problem [J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'93), 1993,27(1):15~18.
- 6 Wolberg G. Digital image warping[M]. IEEE Computer Society Press, Washington DC, 1990.
- 7 LEE S Y, Shin K Y *et al.* Image metamorphosis using snakes and free from deformations [J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'95), 1995,29(4):439~448.
- 8 Burtnyk N, Wein M. Computer generated key-frame animation [J]. Journal of society for Motion picture and television engineering, 1971,80(3):149~153.
- 9 Reeves W T. In-betweening for computer animation*utilizing moving point constraints[J]. Computer Graphics, 1981,15(3): 263~269.
- 10 Sun Y W, Wang W, Chin F Y L. Interpolating polyhedral models using intrinsic shape parameters[A]. In: Proceedings of the third pacific conference on computer graphics and applications, Pacific graphics'95[C]. Oslo, 1995:133~147.
- 11 Carmel E, Cohen-or D. Warp-guided object-space morphing[J]. The visual computer, 1997,13(9+10):465~478.
- 12 Cohen-or D, Levin D, Solomovoci A. Contour blending using warp-guided distance field interpolation[A]. In: Proceeding of Visualization'96[C]. San Francisco, 1996:165~172.
- 13 Goldstein E, Gotsman C. Polygon morphing using a multiresolution representation[A]. In: Proceedings of Graphics interface'95[C]. Paris, 1995:247~254.
- 14 Burtnyk N, Wein M. Interactive skeleton techniques for

- enhancing motion dynamics in key frame animation [J]. Communication of the ACM, 1976,19(10):564~569.
- 15 Shapira M, Rappoport A. Shape blending using the star-skeleton representation [J]. IEEE Compute, Graphics and application, 1995,15(3):44~50.
- 16 Steven M Seitz, Charles R Dyer. View Morphing[J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'96), 1996,30(1):21~30.
- 17 Hughes J F. Scheduled fourier volume morphing[J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'92), 1992,26(2):43~46.
- 18 He T, Wang S, Kaufman A. Wavelet-based volume morphing [A]. In: Proceedings of Visualization'94 [C], San Diego, 1994: 85~91.
- 19 Leries A, Garfinkle C D, Levoy M. Feature-based volume metamorphosis [J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'95), 1995,29(4):449~464.
- 20 Levin D. 1986. Multidimensional reconstruction by set-valued approximation[J]. IMA J. Numer. Anal. 1986,6:173~184.
- 21 Herman G T, Zheng J, Bucholtz C A. Shape-based interpolation [J]. IEEE CG&A, 1992,12(5):69~79.
- 22 Payne B A, Toga A W. Distance field manipulation of surface models[J]. IEEE CG&A, 1992,12(1):65~71.
- 23 Cohen D, Levin D, Solomovici A. Three-dimensional distance field metamorphosis [J]. ACM Transactions on Graphics, 1998,17(2):116~141.
- 24 Bao H, Peng Q. Interactive 3D morphing [J]. Computer Graphics Forum, 1998,17(3):23~30.
- 25 Fang Xiang, Bao HuJun *et al.* Continuous field based free-from surface modeling and morphing [J]. Computers & Graphics, 2001,25(2):235~243.
- 26 Chen S, Parent R E. Shape averaging and its application to industrial design[J]. IEEE CG&A, 1989,9(1):47~54.
- 27 Bethel E W, Uselton S P. Shape distortion in computer-assisted keyframe animation [A]. In: computer animation'89, state-of-the-art in computer animation, computer graphics international [C], London, Atlanta, 1989:215~224.
- 28 Kent J R, Carlson W E, Parent R E. Establishing correspondences by topological merging: a new approach to 3D shape transformation [A]. In: Proceedings of Graphics Interface'91[C], HongKong, 1991:271~278.
- 29 Kent J R, Carlson W E, Parent R E. Shape transformation for polyhedral objects [J]. Computer Graphics, 1992,26(2):47~54.
- 30 Parent R E. Shape transformation by boundary representation interpolation: a recursive approach to establishing face correspondence [J]. Journal of Visualization Computer & Animation, 1992,3(5):219~239.
- 31 Lazarus F, Verroust A. Feature-based shape transformation for polyhedral objects [A]. In fifth Eurographics workshop on animation and simulation[C], Amsterdam, 1994,131~135.
- 32 Lazarus F, Verroust A. Metamorphosis of cylinder-like objects [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1997,8:131~146.
- 33 DeCarlo D, Gallier J. Topological evolution of surfaces[A]. In: proceedings of Graphics Interface'96[C], Tokyo, 1996:194~203.
- 34 Gregory A D, State A *et al.* Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra[A]. In: Computer Animation'98[C], Berlin, 1998, 245~248.
- 35 Shneerson M, Shapiro A, Tal A. Polyhedron realization and its application to metamorphosis. In Proceedings of the 1999 15th Annual Symposium on Computational Geometry [C], Paris, 1999:413~414.
- 36 Gregory A D, State A *et al.* Feature-based surface decomposition for polyhedral morphing. In Proceedings of the 1999 15th Annual Symposium on Computational Geometry[C], Paris, 1999,415~416.
- 37 Kaul A, Rossignac J. Solid-interpolating deformations: construction and animation of PIPs [J]. Computer Graphics, 1992,16(1):107~115.
- 38 Rossignac J, Kaul A. AGRELS and BIBs: metamorphosis as a Bezier curve in the space of polyhedra[A]. In: Eurographics'94 [C], Oslo, 1994:179~184.
- 39 Galin E, Akkouche S. Blob metamorphosis based on Minkowski sums [A]. In: Proceedings of eurographics'96 [C], London, 1996:C149~C153.
- 40 Galin E, Akkouche S. Shape constrained blob metamorphosis. In Implicit Surface'96[C], New York, 1996:9~23.
- 41 刘文予,李华,朱光喜. 基于广义形态内插的非刚体运动描述方法及应用[J]. 软件学报,2001,12(10):1544~1551.
- 42 刘文予,李华,朱光喜. 基于形态变换的非刚体运动及变形新方法[J]. 高技术通讯,2001,10(120):48~51.

李华 1975年生,1990年就读于华中理工大学电信系,1994年获华中理工大学电信系学士学位,1996年于华中理工大学电信系攻读硕士学位,1998年直接攻读博士学位。主要研究领域为计算机视觉、多媒体通信、计算机网络应用。



朱光喜 1945年生,1969年毕业于(华中工学院)华中理工大学,现为华中理工大学电子与信息系教授,博士生导师,任电子与信息工程系主任。长期从事计算机图象图形处理、多媒体通信等领域的工作。现主要从事 CSCW、数字电视、多媒体通信等工作,获得多项研究成果,发表论文近百篇。



朱耀庭 1939年生,1961年毕业于(华中工学院)华中理工大学,1986年晋升教授,曾任华中理工大学副校长,现为博士生导师。目前从事数字图象处理、计算机视觉、电子设备故障诊断专家系统等研究工作,发表论文百余篇。