

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)12-2095-10

论文索引信息: 董洪伟. 网络变形综述[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2095-2104

网络变形综述

董洪伟

(江南大学物联网工程学院, 无锡 214122)

摘要: 网络变形作为一种几何模型交互编辑技术在几何建模和计算机动画中具有重要价值。近年来, 保细节的网络变形特别是微分域网络变形一直得到国内外研究人员的高度关注。从骨骼变形、曲面变形、空间变形3个方面, 结合近年来网络变形领域的最新研究进展, 通过对各种典型的网络变形算法的算法思想、特点、局限性的描述和比较, 提供该领域研究现状的系统综述。并对网络变形的研究趋势进行了展望。

关键词: 网络变形; 空间变形; 微分域变形; 综述

Survey of mesh deformation

Dong Hongwei

(School of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122 China)

Abstract: As an interactive geometry editing technique, mesh deformation plays an important role in geometry modeling and computer animation. Detail-preserving mesh deformation, especially differential domain deformation techniques gains high interests in the computer graphics community in recent years. Combined with recent advancements on mesh deformation methods classified into skeletal deformation, surface deformation, and space deformation, this paper provides a systematic survey on this area, trying to give a comprehensive introduction and comparison to those typical mesh deformation methods from their algorithmic principles, advantages and limitations. Furthermore, the opportunities of future research in mesh deformation are discussed.

Keywords: mesh deformation; space deformation; differential domain deformation; survey

0 引言

网络变形(也称网格编辑)是指通过用户编辑操作或约束对几何模型的形状进行修改的几何处理技术, 在工业和艺术设计等领域有着广泛的应用。如3维动画中需要对已有模型进行变形设计以产生关键帧或关键帧中间的插值帧。随着高分辨率网格几何模型的普及以及相关应用如高度逼真的3维动画的需求, 保持模型几何细节的交互

式网络变形技术成为近年来几何处理领域的热点研究问题。从早期的自由曲面变形(FFD)、骨骼蒙皮变形、到近年来流行的微分域(differential domain)网络变形, 国内外研究人员不断提出新的有效的网络变形算法并将网络变形技术应用到各种应用问题中。

特别是最近几年, 从国际顶级会议SIGGRAPH的情况看, 国内外研究人员对网络变形技术一直保持着持续的热情, 研究不断深入, 鉴于此, 文献[1-2]对基于拉普拉斯(Laplacian)变形为主的梯度域网络变形从变形能量的相关

收稿日期: 2010-07-22; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP 211A35)。

第一作者简介: 董洪伟(1967—), 男, 副教授。2001年于南京航空航天大学获宇航制造专业博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉、数控技术。E-mail: hwdong1234@yahoo.com.cn。

性分析和细节保持性等角度进行了较为系统的综述。试图对包括其他变形技术如骨骼蒙皮变形、自由曲面变形等的网格变形研究进行较为系统全面的综述,以期有助于国内研究人员快速了解网格变形的研究状况与最新进展,为进一步研究提供线索和参考。

1 基于骨骼的蒙皮变形

早在 1972 年, Catmull^[3] 就提出骨骼驱动动画技术, 1988 年 Thalmann^[4] 提出基于定制函数的 3 维骨骼蒙皮技术将皮肤的运动看成潜在骨骼的函数。随后所谓的“线性混合蒙皮”(LBD)(也称“骨骼子空间变形”(SSD 或 SSE))骨骼蒙皮技术以其简单高效的优点成为骨骼蒙皮动画特别是实时动画中的首选技术。LBD 的原理是用变形矩阵表示骨骼运动,皮肤上的点的变换是关联骨骼变换的线性组合:给定一个参考人体骨骼及皮肤模型,LBD 给每个皮肤顶点一组关联的影响骨及影响权,当骨骼变化时,每个皮肤顶点 v 随着影响程度不同的影响骨做刚性运动,该顶点的最终位置 v 取决于这些关联骨变换的线性组合。

LBD 有两个主要缺点:1)会产生不自然的皮肤变形如皮肤塌陷(skin collapsing, joint collapses)或裹糖纸(candy-wrapper);2)需要有经验的动画师手工指定骨关联权,这通常是一个费时的调试过程。此后的研究主要围绕解决这两个问题展开。

Mohr^[5] 通过计算并显示可能的顶点变形子空间并让用户直接交互地操纵皮肤顶点,自动求解骨影响集及相应的权,很大程度上提高了设计骨影响权的效率。

基于例子插值可以有效的避免不自然的皮肤变形,如 Lewis^[6] 在 2000 年提出结合 LBD 和例子插值的皮肤变形统一框架-姿势空间变形(PSD)将变形看成从骨骼参数或其他抽象参数到皮肤局部坐标系的映射,提高了变形框架的表达能力,并用基于径向基的例子插值对 LBD 的皮肤变形进行纠正。此后, Sloan 的“从例子造型”^[7] 和 Kry 的“EigenSki”^[8] 也采用类似的基于例子混合的方法改进 LBD 的皮肤变形效果, Allen^[9] 则基于激光扫描获取的例子插值产生逼真的皮肤变形,但获取这些变形例子的成本比较高。为了产生如“隆起”

的精细皮肤变形效果并消除不自然的皮肤变形, Mohr^[10] 等提出结合例子插值的扩展 LBD 技术,基于例子首先确定影响一个皮肤顶点的骨集合,再求解一个双线性最小二乘问题拟合潜在骨骼模型的参数,通过在标准骨骼上自动添加额外的骨并允许用户微调额外骨产生更逼真的皮肤变形效果。Wang^[11] 提出的多权封套(MWE)不同于通常的每骨每点一个权的单权封套蒙皮(SWE),每骨每个顶点有最多 12 个权,同样基于输入例子求解最小二乘问题确定这些权,可产生较好的皮肤变形;但 MWE 存在过拟合,这种多个权的扩展 LBD 也很难用硬件加速。动画空间(animation space)^[12] 对此进行了改进,每个骨每个顶点 4 个权。除了传统的基于矩阵变换的 LBD 外,人们还提出直接四元组混合(direct quaternion blending)^[13]、矩阵对数混合(log-matrix blending)^[14]、球混合(spherical blending)^[15]、基于例子梯度的旋转回归^[16]、对偶四元组混合^[17] 等改进的 LBD 方法,基于例子梯度变形的旋转回归分析代替线性回归分析可以产生较好的隆起、扭曲等肌肉效果,基于对偶四元组线性混合(dual quaternion blending)的对偶四元组蒙皮方法,在几乎不牺牲传统的 LBD 方法效率的同时,较好地解决了 LBD 蒙皮中的不自然变形问题。

基于 LBD 原理, Singh 等人^[18] 对非骨骼型的一般曲面网格构造一个粗的控制网格并将精细网格顶点配准到附近的控制网格的三角形局部坐标系中并计算相应的影响权,通过控制网格的变形驱动精细网格的变形。James^[19] 通过对给定网格的一组变形例子的聚类学习确定刚性和柔性骨以及骨对顶点的影响权,从而生成一般网格的“蒙皮网格动画”(skinning mesh animation)。基于这种针对一般网格的蒙皮网格变形方法, Feng 等人^[20] 通过典型关联分析学习控制点和骨变换之间的关联,基于离线学习的变形预测器,可以实时地根据新的控制点位置产生网格变形。

在医学等应用中,人们更多采用基于物理或生理仿真的皮肤变形技术,用仿真骨骼、肌肉、脂肪组织、表皮等元素模仿复杂的人体解剖结构。Chadwick^[21] 早在 1989 年就提出包含骨骼、肌肉和脂肪、皮肤的多层人体结构,骨骼层的运动驱动中间的肌肉和脂肪层的自由变形,进而一起驱动最外层皮肤的变形。Terzopoulos 和 Waters^[22] 提出一个由

3 层质点-弹簧网格构成的组织和仿解剖学面部肌肉装置构成的层次人脸模型,通过离散拉格朗日方程表示的质点-弹簧动态系统仿真面部表情,该文还研究了从面部视频序列估计动态的面部肌肉收缩驱动人脸表情。Scheepers^[23]用椭球体表示肌肉并通过椭球的三轴的变化模拟肌肉的隆缩,肌肉模型能自动响应骨骼的变化,肌肉脂肪的运动驱动关联的 Bézier 曲面表皮的控制顶点的变化产生最终的皮肤变形效果。这类研究主要集中于如何仿真肌肉组织,限于篇幅,本文不再详细介绍,基于物理的物体变形可参考文献[24]。

2 基于曲面的网格变形

2.1 曲面变形的数学基础——基于薄壳能量的变形

基于曲面的网格变形就是在满足用户编辑约束下得到一个直观上合理的新曲面,从数学上看,就是确定曲面变形前后的一个位移函数 $d: S \rightarrow R^3$, 该函数将待编辑曲面 S 的每个点映射到变形曲面 S' 的相应点:

$$S' = \{p + d(p) \mid p \in S\} \quad (1)$$

网格变形的最典型、直观的约束是位置约束,即用户选择曲面上的一些点作为变形句柄,通过指定这些点的新位置,将曲面 S 变形到新曲面 S' 。新曲面上的句柄点必须满足这些位置约束:

$$d(p_i) = d_i, \forall p_i \in H \quad (2)$$

直观上,曲面可以看成弹性皮肤,满足这些位置约束的网格变形的薄壳能量应最小化^[25]:

$$E_{shell}(S') = \int_{\Omega} k_s \|I' - I\|^2 + k_b \|II' - II\|^2 dudv \quad (3)$$

式中,第一、二项分别表示第一、二基本型的变化能量,分别用来刻画拉伸和弯曲变形的程度,而常数 k_s, k_b 则是抵抗拉伸和弯曲的刚性系数。最佳的网格变形应该在满足位置约束的条件下使变形薄壳能量最小。对于交互式应用,求解上述最小化问题是昂贵的,文献[26-27]基于位移函数的偏导数将该能量线性简化为

$$E_{shell}(d) = \int_{\Omega} k_s (\|d_u\|^2 + \|d_v\|^2) + k_b (\|d_{uu}\|^2 + \|d_{uv}\|^2 + \|d_{vv}\|^2) dudv \quad (4)$$

式中, d_u, d_v 是位移函数的一阶偏导数,而 d_{uu}, d_{uv}, d_{vv} 则是位移函数的二阶偏导数。根据变量积分原

理,上述线性薄壳能量的最小化问题等价于求解满足位置约束的 Euler-Lagrange 方程:

$$-k_s \Delta_s d + k_b \Delta_s^2 d = 0 \quad (5)$$

Botsch 等人^[28]的基于句柄的交互式网格曲面变形将曲面分为句柄 H 、固定区域 F 以及两者之间的过渡区域 P ,应用离散的 Laplace-Beltrami 算子,将约束能量最小化问题转化为如下的稀疏线性系统:

$$\begin{aligned} -k_s \Delta_s d + k_b \Delta_s^2 d &= 0 & p_i &\notin H \cup F \\ d(p_i) &= d_i & p_i &\in H \\ d(p_i) &= 0 & p_i &\in F \end{aligned} \quad (6)$$

Bickel^[29]采用上述的线性薄壳模型对一个高分辨率模板根据点约束(大约 100 个句柄点)进行人脸大尺度变形,在此基础上,从这些句柄点构造一个特征图表示皮肤的张力,基于特征图定义的特征向量通过例子姿势学习细尺度的网格变形,这种姿势空间变形(PSD)被叠加到大尺度变形上,产生具有褶皱效果的细尺度脸部变形。

2.2 张量积曲面的变形

计算机辅助几何设计曲面的典型表示方法是样条曲面,以控制顶点为系数对定义在矩形网格参数域上的样条基函数进行线性组合表示一个参数曲面片:

$$f(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m C_{ij} N_i^m(u) N_j^n(v) \quad (7)$$

式中, C_{ij} 是控制顶点, $N_i^m(u) N_j^n(v)$ 是该顶点对应的样条基函数,样条曲面片保证了曲面足够的光滑性,通过修改控制顶点的位置,可形成新的光滑曲面。均匀控制网格的样条曲面的控制顶点会影响曲面的大部分区域,文献[30]提出层次 B 样条,通过在粗网格的局部区域叠加精细的控制网格可以对曲面进行精细的曲面变形。

2.3 多分辨率变形

基于线性薄壳能量的变形不能处理几何细节的旋转问题,多分辨率变形借鉴多分辨率模型在网格光顺等几何处理问题的成功经验,通过将网格模型 S 分解为低频的基网格 B 和高频的几何细节 D ,对低频的基网格 B 先进行变形,再将高频的几何细节 D 叠加到变形的基网格 B' 上,可以在保持网格模型整体形状基础上较好地保持几何细节,产生直观上合理的变形网格 $S' = B' \oplus D$ 。

根据分解和叠加几何细节方法的不同,多分辨率变形方法可以分为位移向量法、法矢量位移法、位

移体和变形传输等。位移向量法^[31]将几何细节表示为基网格上的一个位移函数 $h: B \rightarrow R^3$, 典型地, B 和 S 具有一致的网格连接, 其对应顶点 b_i 和 p_i 具有一个简单的位移关系 $h_i: p_i = b_i + h_i$, 其中 h_i 是几何细节, 由定义在基网格的局部坐标系的位移表示, 当基网格 B 变换到 B' 时, 位移向量随着变形的基网格的旋转而旋转, 从而使曲面细节更好地保持。为减少长位移向量引起的不稳定变形, 文献[32-33]用基网格顶点的法矢量方向的射线对原始网格重采样, 将采样点和基网格顶点的位移作为几何细节, 文献[34]则反过来, 对网格 S 上的顶点逆向寻找基网格 B 上的最近点, 将两点之间的位移作为法矢量位移, 可以避免对网格 S 的重采样并能在网格变形时较好地保持尖锐特性。由于相邻顶点的位移是相互独立的, 法矢量位移方法同样存在几何细节扭曲甚至自交的问题, 为此, 文献[35]提出一种位移体的解决方法, S 的每个三角形和 B 上的对应三角形形成一个三棱柱, 柱体的体积作为几何细节并在变形过程中保持该体积。基于体位移的方法可以产生更加合理自然的结果并避免自交问题, 但该方法的非线性重构细节过程比较费时。文献[36]借鉴文献[37]的变形传输思想, 通过将基网格 $B \rightarrow B'$ 的变形传输到细节网格 S 上得到变形的细节网格 S' , 该方法可产生与位移体类似的结果, 但仅需要求解一个稀疏线性系统, 该方法在结果和性能上介于位移向量和位移体之间。

2.4 基于微分坐标的变形

基于微分坐标的变形技术用局部微分坐标表示几何细节, 在满足用户约束的条件下尽可能地保持这些反映几何细节的微分坐标, 但由于定义在全局坐标系的微分坐标不是旋转不变的, 仅仅保持微分坐标不变的网格变形会产生扭曲的变形。围绕如何更好地逼近变形网格的微分坐标, 国内外研究人员进行了许多卓有成效的研究工作, 使得基于微分的网格变形因其简单、健壮和性能优势, 成为近年来网格变形的主流技术。

2.4.1 基于梯度的网格变形

基于梯度的网格变形思想来自于基于梯度的图像操作技术。基于梯度的图像技术通过求解满足不同边界约束条件的 Poisson 方程对图像进行变换操作:

$$\Delta I' = \text{div} g' \quad (8)$$

式中, g' 是对原图像梯度 g 修改后的梯度, $\text{div} g'$ 则

是其散度, 而 I' 则是待求的未知图像强度。文献[38]则通过求解一个满足狄利克雷 (Dirichlet) 边界的 Poisson 问题, 将源图像无缝粘贴到目标图像中, 使粘贴区域内部的梯度等于源图像内部的梯度, 而粘贴区域边界梯度等于目标图像相应位置的梯度, 以实现图像的无缝粘贴和克隆。

基于梯度的网格变形^[39]将变形问题归结为如下的满足狄利克雷 (Dirichlet) 边界条件的 Poisson 问题:

$$\Delta f = \nabla \cdot w, \quad f|_{\partial \Omega} = f^*|_{\partial \Omega} \quad (9)$$

式中, $\nabla \cdot w$ 是定义在网格流形上的向量场 w 的已知散度, f^* 是边界上的期望值, f 是待求的数值函数, 即顶点坐标, 而 Δ 是拉普拉斯算子。根据对网格曲面上的数值和向量场的微分操作离散化表示的理论研究, 上述 Poisson 方程中每个网格顶点 v_i 处的数值场 f 的拉普拉斯 Δf 和向量场 w 的散度 $\nabla \cdot w$ 可分别表示如下:

$$\Delta f(v_i) = \sum_{v_j \in N_v(v_i)} \frac{1}{2} (\cot \alpha_j + \cot \beta_j) (f_i - f_j) \quad (10)$$

$$(\text{div} w)(v_i) = \sum_{T \in N_T(v_i)} w(T) \cdot \nabla \phi_i|_T A_T \quad (11)$$

式(11)中, T 是顶点 v_i 的邻接三角形, A_T 是三角形 T 的面积, ϕ_i 是基函数在顶点 v_i 的值。

结合给定的边界条件, 上述方程的求解是一个稀疏线性系统: $Ax = b$ 。其中 A 取决于拉普拉斯算子, 而 b 则取决于已知向量场及边界条件。

由于梯度的方向依赖于全局坐标系, 梯度不是刚性不变量, 直接基于位置约束条件求解上述基于梯度的变形网格不能产生令人满意的结果。文献[39-40]基于句柄变换对变形区域的变换进行线性插值, 分别基于测地距离和调和场构造对变换进行线性插值的混合函数, 然后基于插值的变换对梯度进行更新, 最后基于更新的梯度求解上述的 Poisson 方程。

2.4.2 基于拉普拉斯 (Laplacian) 坐标的网格变形

拉普拉斯网格变形用拉普拉斯坐标代替梯度表示几何细节, 拉普拉斯坐标具有刻画顶点均值曲率和法矢量的能力, 一个网格顶点的均匀拉普拉斯坐标表示为该顶点坐标与其邻接点均值坐标的差:

$$\delta_i = \Gamma(v_i) = v_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N_i} v_j \quad (12)$$

更常用的则是上述公式中的共切拉普拉斯坐标:

$$\delta_i^c = \frac{1}{|A_i|} \sum_{j \in N_i} \frac{1}{2} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) (v_i - v_j) \quad (13)$$

式中, A_i 是顶点 v_i 的 Voronoi 单元面积, α_{ij}, β_{ij} 是边 $v_i v_j$ 关联三角形的对角, $\cot \alpha_{ij}, \cot \beta_{ij}$ 是它们的余切。

网格变形归结为如下的位置约束的优化问题:

$$\min(\sum_{i=1}^m \| \Gamma(v'_i) - \delta'_i \|^2 + \alpha \sum_{i=1}^m \| p'_i - q_i \|^2) \quad (14)$$

式中, δ' 是变形网格的拉普拉斯坐标, q_i 是约束顶点的新位置, p'_i 是待求的变形后的顶点坐标, α 是用户指定的平衡拉普拉斯保持能量与位置约束能量的能量系数。

由于变形网格 S' 及其拉普拉斯坐标 δ' 都未知, 为方便有效地求解上述非线性问题, 起初人们用原网格拉普拉斯坐标 δ 近似 δ' , 将非线性优化问题转化为近似的线性优化问题。如 Alexa^[41] 首先用均匀拉普拉斯坐标 δ 表示几何细节, 通过对自由顶点求解

$$\min(\sum_{i=1}^N \| \Gamma(v'_i) - \delta_i \|^2 + \alpha \sum_{i=1}^m \| p'_i - q_i \|^2) \quad (15)$$

得到变形后的网格。和基于梯度的网格变形一样, 拉普拉斯坐标也不具有旋转不变性, 简单地用原始拉普拉斯坐标 δ 近似未知变换网格的拉普拉斯坐标 δ' , 很容易产生扭曲的变形。围绕拉普拉斯变形的许多研究工作集中于如何更好地逼近未知的拉普拉斯坐标 δ' , 特别是处理拉普拉斯坐标的旋转问题。Lipman^[42] 通过估计曲面的局部旋转的方式重建变形曲面, 即先基于原始拉普拉斯坐标计算变形网格, 基于变形网格求解每个顶点的局部旋转并用该局部旋转对最原始拉普拉斯坐标进行变换, 再根据新拉普拉斯坐标重新求解变形网格。Zayer^[40] 则沿调和场传播句柄变换以更新拉普拉斯坐标; Zhou^[43] 将拉普拉斯操作从曲面扩展到其内部, 用所谓的体拉普拉斯坐标表示几何细节, 采用 WIRE^[44] 的交互变形技术对由网格顶点构成的 2 维投影控制曲线变形, 并将控制曲线变换传播到所有网格顶点以更新体拉普拉斯坐标, 求解类似的优化问题得到变形网格, 可以避免体积的不自然变化和局部自交。Sheffer^[45] 提出旋转不变的金字塔坐标代替拉普拉斯坐标, 用局部坐标系的法向和切向的细节系数表示金字塔坐标, 其中法向系数编码了顶点到局部切平面的距离, 而切向成分编码了邻接边在切平面投影的长度及夹角, 并通过一个非线性的迭代求解过程重构变形网格; Au^[46] 基于对偶网格, 提出类似的

局部坐标, 并采用类似的非线性迭代求解过程求解对偶网格及该变形网格; 非线性优化方法尽管可以在一定程度上改善变形质量, 但基于迭代的非线性优化过程计算量大。上述方法对于变化幅度较大的网格变形都不理想。

Lipman^[47] 提出基于局部坐标架的离散形表示几何细节, 相邻顶点的局部坐标架的差可用其中一个顶点的坐标架表示:

$$\begin{aligned} b_1^j - b_1^i &= \alpha_{11}^{ij} b_1^i + \alpha_{12}^{ij} b_2^i + \alpha_{13}^{ij} N^i \\ b_2^j - b_2^i &= \alpha_{21}^{ij} b_1^i + \alpha_{22}^{ij} b_2^i + \alpha_{23}^{ij} N^i \\ N^j - N^i &= \alpha_{31}^{ij} b_1^i + \alpha_{32}^{ij} b_2^i + \alpha_{33}^{ij} N^i \end{aligned} \quad (16)$$

式中, 系数 α_{kl}^{ij} 由原始网格的离散形确定, 相邻顶点构成的边向量也可用其中一个顶点的局部坐标架表示:

$$v_j - v_i = \beta_1^{ij} b_1^i + \beta_2^{ij} b_2^i + \beta_3^{ij} N^i \quad \forall (i, j) \in E \quad (17)$$

式中系数 β_k^{ij} 可由原始网格的离散形和局部坐标架矢量决定。当用户交互指定句柄顶点及其旋转变换后, 通过两步的稀疏线性系统的求解依次确定顶点的局部坐标架和变形后的顶点坐标。该方法虽然能健壮地产生高质量的变形结果, 但需要用户指定句柄的旋转变换, 给使用者带来了不变, 限制了该方法的应用特别是不适用于那些非交互的网格变形应用。

Huang^[48] 为了使变形保持体积及相应的刚性, 除重新定义了非线性拉普拉斯约束, 还引入了体积约束、骨骼约束、投影约束, 为提高非线性约束求解的性能, 进一步引入包围曲面网格的粗控制网格, 并基于中值坐标将这些约束投影到控制网格上, 通过迭代更新拉普拉斯坐标的过程求解规模更小的控制网格并根据中值坐标得到最终的变形网格, 不仅提高了算法的健壮性、改善了收敛性, 也很大程度上提高了求解效率, 使得网格变形可以交互进行。该方法可以有效地保持体积、骨骼刚性和长度, 但需要对每个变形网格手工构造一个控制网格, 很不方便。

Sorkine^[49] 同样基于“变形-求局部旋转-再变形”的迭代过程求解变形网格, 并建议通过渐进约束的方式处理大旋转变形。Au^[50] 基于句柄顶点从调和场计算等值变换线, 这些变换等值线构成了类似于蒙皮变形的骨骼, 变形网格表示为等值线变换的线性插值, 从而在简化的等值线变换域上求解一个非线性优化问题, 使得复杂网格的变形可以交互进行, 且有效地解决了细节的旋转问题。

Eigensatz^[51]通过集成包含曲率、长度、面积等多种约束能量的非线性优化,提供更灵活的网格变形控制。Gal 等人^[52]考虑到现有的网格变形技术不能用于诸如 CAD 等非自由曲面模型,对模型进行全局光滑变形不能保留这些模型的设计特性和工程含义,通过“分析然后编辑”的过程,先对模型进行分析抽取出一组智能线架曲线及分析其相互关系,然后通过交互修改智能线架曲线对模型进行编辑,从而使编辑的模型能保持原始模型的设计意图和特征。

值得一提的是,近年来动画界也对网格变形进行了关注并用于相关的研究中,如文献[53]应用基于四面体网格和三角网格的拉普拉斯变形技术,用激光扫描的人物模板拟合从视频中抽取的运动约束逼真地重建运动人物的表演;文献[54]也基于拉普拉斯变形技术从多视轮廓重建人物,同样实现了从视频重建逼真的人物动画。

2.5 基于局部变换的网格变形

重用已有的网格变形数据,可有效地提高网格变形的制作效率并降低制作成本。变形传输通过将源模型上的变形传输到目标模型上重用已有的网格变形。文献[55]提出基于顶点位移向量的“表情克隆”技术将一个人脸模型的表情变化传输到另一个人脸模型上。一个人脸表情定义为该表情模型的每个顶点相对于该人脸参考模型对应顶点的位移向量,根据源参考模型和目标参考模型之间的少数对应点对,通过基于 RBF 插值技术的体形变(volume morphing)将源参考模型向目标参考模型变形并进一步用柱面投影方法将变形的源参考模型嵌入到目标参考模型中,从而建立源参考模型和目标参考模型之间的稠密对应关系,然后通过基于中心坐标插值并根据局部曲面和局部尺寸调整顶点位移的方向和大小,得到对应的目标网格的顶点位移向量,从而对目标脸进行变形。借鉴该文的思路,Sumner 等人^[37]将其推广到一般网格曲面的变形传输上,每个三角形的变形用一个仿形变换表示,并用顶点坐标表示该变换的非平移部分,在变形传输时,用户首先指定一些初始的对应点,通过求解一个由初始对齐约束、对应点约束、非平移变换光滑性约束和刚性变换约束构成的能量优化问题得到变形网格:

$$\min_{v_1 \cdots v_n} E(v_1 \cdots v_n, c_1 \cdots c_n) = w_s E_s + w_l E_l + w_c E_c \quad (18)$$

边界约束: $\tilde{v}_{s_k} = m_k, k \in 1, \cdots, m$

式(18)中, $v_1, \cdots, v_n$ 是顶点坐标, $c_1, \cdots, c_n$ 是约束, w_s, w_l, w_c 分别是平衡不同能量项 E_s, E_l, E_c 的权, m_k 是第 k 个标记点的目标位置。

基于用局部仿形变换表示变形细节的思想, Sumner 等人^[56]提出基于例子的逆网格运动学方法并应用于基于句柄的网格变形,将每个例子的变形表示为一个基于局部变换的变形特征向量,用所有例子的变形特征向量的非线性组合表示任意一个网格变形的特征向量,通过求解如下的非线性优化问题得到满足句柄位置约束的网格变形:

$$x^*, w^* = \arg \min_{x, w} \| Gx - (M(w) + c) \| \quad (19)$$

式中未知量 x^* 包含变形网格的顶点坐标, w^* 是变形特征向量的组合系数。 Gx 是变形网格的特征向量, $M(w)$ 是变形特征向量的组合函数。文献[57]进一步采用基于骨代理的简化变形网格改进了算法的效率,使得算法的变形操作可以交互进行。

3 基于空间变形的网格变形

基于曲面的变形技术通过求解一个尽可能满足用户约束和保持曲面细节的能量优化问题确定一个定义在曲面上的光滑变形场,曲面的复杂性和质量对算法的效率和健壮性有显著的影响。空间变形技术(也称为自由曲面变形(FFD)或空间形变(warping))通过对曲面嵌入空间的变形对曲面进行变形可以避免上述问题。空间变形通过求解一个空间的变形场 $d: \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^3$ 对嵌入的曲面 S 进行变换:

$$p' = p + d(p), p \in S \quad (20)$$

空间变形可以对任意嵌入其中的物体(曲面)进行变形,这种独立于具体物体几何表示的空间变形技术具有简单、高效等优点,作为一个主流变形技术之一在工业设计等领域中一直有着广泛的应用。

3.1 基于控制网格的自由曲面变形

Barr^[58]早在 1984 年提出实体的全局和局部变形方法,该方法基于对物体施加不同的矩阵变换产生尖角、扭曲、弯曲等变形效果, Blanc^[59]用形状函数作为矩阵元素进一步扩展了 Barr 的工作,可产生印模(mold),错切(shear)和挤压(pinch)等变形效果。基于矩阵变换的方法要产生任意形状变形很困难, Sederberg 等人^[60]提出自由曲面变形(FFD)方法,用一个包围物体的立方体网格(lattice)作为 3 维控制网格,通过对控制网格的顶点的位移向量作为系数进行三变量张量积插值表示 3 维变形场:

$$d(u,v,w) = \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{c_{ijk}} N_i^l(v) N_j^m(v) N_k^n(v) \quad (21)$$

通过修改控制顶点的位移向量 $\delta_{c_{ijk}}$ 对嵌入其中的物体进行光滑变形。Coquillart^[61] 则用不同类型的非平行的控制网格如柱面网格代替平行的立方体控制网格对 FFD 进行了改进。这种简单快速的变形技术很快在几何造型、动画制作中得到广泛应用,但通过操纵控制网格顶点对嵌入网格的物体进行间接变形的技术仍需要费时的用户调试操作,不够直观灵活。文献[62]提出逆 FFD 变形方法,通过求解一个满足位置约束的线性系统反求控制网格顶点的位移,使得可以直接操纵曲面进行网格变形。

Floater^[63] 提出针对任意 2 维多边形的中值坐标,作为插值多边形内部的闭合解, Floater^[64] 和 Ju^[65] 进一步将 2 维中值坐标推广到 3 维, Ju 基于 3 维中值坐标进行网格变形。文献[66-67]进一步改进中值坐标,提出了调和坐标和正中值坐标,但它们不再是控制顶点的闭合表示。Lipman 等人^[68] 观察到基于顶点坐标的中值坐标表示不是仿形不变量,基于格林函数提出格林坐标,使得格林坐标不仅依赖于控制网格顶点坐标,且依赖于控制网格的面的方向,并给出了格林坐标的闭合解,使得格林坐标产生的变形在 2 维情形是保形的,在 3 维情形是准保形的,基于格林坐标的变形不仅能产生高质量变形且保持中值坐标的高效率。

3.2 基于径向基函数(RBFs)的网格变形

基于散乱数据插值的径向基函数插值技术可以生成光滑的插值曲面,被广泛的应用于曲面重构等应用。由一组中心点 c_j 和相应的权 w_j 定义的三变量径向基函数为

$$f(x) = \sum_j w_j \varphi(\|c_j - x\|) + p(x) \quad (22)$$

式中, $\varphi(\|c_j - x\|)$ 是定义在中心 c_j 的径向基函数, $p(x)$ 是保证精度的低次多项式函数。Chai^[69] 基于空间径向基插值建立运动捕获人脸模型和虚拟人脸模型的对应以及人脸表情变形之间的对应。Botsch 等人^[70] 定义类似的 3 维径向基插值变形场,通过求解一个线性系统,得到作为未知变量的径向基混合权和低次多项式的系数,从而确定变形场对嵌入其中的形体进行变形。

3.3 基于局部变换的空间嵌入网格变形

Botsch^[71] 将模型以自适应的方法体素化(voxelized),通过求解尽可能保持这些六面体体素刚性变换的非线性弹性能量优化问题,产生了令人

满意的变形结果。

Sumner^[72] 扩展其逆网格运动学^[56] 的优化方法,结合曲面变形和空间变形技术,提出一个空间嵌入的网格变形方法,首先对原始网格曲面进行均匀粗采样,得到一个空间嵌入变形图,原始曲面网格的变形表示为该变形图结点的变形的线性组合,通过求解类似^[56] 的能量优化问题得到变形的变形图,从而对网格进行变形。由于嵌入变形图的结点数目要远远小于原始曲面网格的顶点数目,算法具有较好的时间效率和健壮性。Li 等人^[73-74] 将文献[72]的空间变形技术应用到非刚性模型的自动对应和配准问题以及单视几何的动态重建,文献[75]还将该变形配准技术^[74] 应用到基于视频的实时人脸动画的捕获和变形传输上,实时驱动虚拟人脸的动画。

4 结 论

从骨骼蒙皮、基于曲面的变形和空间变形角度介绍和分析各种典型算法的思想、特点、限制及某些应用,对网格变形技术近年来的研究现状进行了总结。尽管目前的网格变形技术在一定程度上可以产生较为逼真的变形效果,但要产生真正有价值的应用仍然还有许多值得研究的问题:

1) 单纯的曲面变形不容易处理大尺度变形,尽管基于非线性优化可以处理几何细节旋转的问题,但大的非线性系统的求解很费时,空间变形一般来说可以较好地处理大尺度变形且具有较高的时间效率,但需要构建控制多边形网格,基于骨骼的蒙皮变形尽管效率很高,但通常用于人体等关键体物体变形,一般网格缺少明显的刚性骨骼结构。因此不同网格变形技术的结合是未来研究方向之一;

2) 现有的网格变形技术都是尽量保证全局变形的平滑性和均匀性,因此不能有效地保持网格模型特征。如何分析和抽取不同类型的网格特征,并在变形中保持这些具有设计和工程意义的特征,产生真正有价值的网格变形是未来需要进一步研究的难题之一;

3) 将网格变形技术应用到其他相关的研究领域如 3 维模型的重建、配准、动画等,以解决更多的具体应用问题。

参考文献(References)

[1] Botsch M, Sorkine O. On linear variational surface deformation

- methods [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(1): 213-230.
- [2] Xu Weiwei, Zhou Kun. Gradient domain mesh deformation-a survey[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(1): 6-18.
- [3] Catmull E. A system for computer generated movies [C]// Proceedings of the ACM annual conference. Boston, USA: ACM, 1972: 422-431.
- [4] Magnenat-Thalmann N, Laperrière R, Thalmann D. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping [C]// Proceedings on Graphics interface '88. Edmonton, Canada: Canadian Information Processing Society, 1988: 26-33.
- [5] Mohr A, Tokheim L, Gleichier M. Direct manipulation of interactive character skins [C]// Proceedings of the 2003 symposium on Interactive 3D Graphics. Monterey, USA: ACM, 2003: 27-30.
- [6] Lewis J P, Cordner M, Fong N. Pose space deformation-a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. New York: ACM, 2000: 165-172.
- [7] Sloan P P J, Charles F, Rose I, et al. Shape by example [C]// Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics. Chapel Hill, USA: ACM, 2001: 135-143.
- [8] Kry P G, James D L, Pai D K. Eigenskin: real time large deformation character skinning in hardware. [C]// ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. San Antonio, USA: ACM, 2002: 153-160.
- [9] Allen B, Curless B, Popović Z. Articulated body deformation from range scan data [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 612-619.
- [10] Mohr A, Gleichier M. Building efficient, accurate character skins from examples [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 562-568.
- [11] Wang X C, Phillips C. Multi-weight enveloping: least-squares approximation techniques for skin animation [C]// ACM SIGGRAPH Symp. on Computer Animation. San Antonio, USA: ACM, 2002: 129-138.
- [12] Merry B, Marais P, Gain J. Animation space: a truly linear framework for character animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(4): 1400-1423.
- [13] Hejl J. Hardware skinning with quaternions [C]// Game Programming Gems 4. New York, USA: Charles River Media, 2004: 487-495.
- [14] Cordier F, Magnenat-Thalmann N. A data driven approach for real-time clothes simulation [J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(2): 173-183.
- [15] Kavan L, Zara J. Spherical blend skinning: a real-time deformation of articulated models [C]// 2005 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Washington, USA: ACM, 2005: 9-16.
- [16] Wang R Y, Pulli K, Popović J. Real-time enveloping with rotational regression [J]. ACM Transaction on Graphics, 2007, 26(3): 73(1-9).
- [17] Kavan L, Collins S, Zara J, et al. Geometric skinning with approximate dual quaternion blending [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(4): 105(1-23).
- [18] Singh K, Kokkevis E. Skinning characters using surface-oriented free-form deformations [C]// Graphics Interface, Montréal, Canada: Canadian Human-Computer Communications Society, 2000: 35-42.
- [19] James D L, Twigg C D. Skinning mesh animations [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 399-407.
- [20] Feng Weiwen, Kim ByungUck, Yu Yizhou. Real-time data-driven deformation using kernel canonical correlation analysis. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 91(1-9).
- [21] Chadwick J E, Haumann D R, Parent R E. Layered construction for deformable animated characters [J]. Computer Graphics, 1989, 23(3): 243-252.
- [22] Terzopoulos D, Waters K. Physically-based facial modeling, analysis, and animation [J]. Journal of Visualization and Computer Animation 1990, 1(2): 73-80.
- [23] Scheepers F, Parent R E, Carlson W E, et al. Anatomy-based modeling of the human musculature [C]// Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1997: 163-172.
- [24] Nealen A, Keiser R, Boxerman E. Physically based deformable models in computer graphics [J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4): 809-836.
- [25] Terzopoulos D, Platt J, Barr A, et al. Elastically deformable models [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. Anaheim, USA: ACM, 1987: 205-214.
- [26] Celniker G, Gossard D. Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. Las Vegas, USA: ACM, 1991: 257-266.
- [27] Welch W, Witkin A. Variational surface modeling [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. Chicago, USA: ACM, 1992: 157-166.
- [28] Botsch M, Kobbelt L. An intuitive framework for real-time freeform modeling [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 630-634.
- [29] Bickel B, Lang M, Botsch M, et al. Pose-Space Animation and Transfer of Facial Details [C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Dublin, Ireland: Eurographics Association, 2008: 57-66.
- [30] Forsey D R, Bartels R H. Hierarchical B-spline Refinement [J]. Computer Graphics, 1988, 22(4): 205-212.
- [31] Zorin D, Schroder P, Sweldens W. Interactive multiresolution mesh editing [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, USA: ACM, 1997: 259-268.
- [32] Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, et al. Normal meshes [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. New Orleans's, USA: ACM, 2000: 95-102.
- [33] Lee A, Moreton H, Hoppe H. Displaced subdivision surfaces [C]// Proc. of ACM SIGGRAPH. New Orleans, USA: ACM,

- 2000;85-94.
- [34] Kobbelt L, Vorsatz J, Seidel H P. Multiresolution hierarchies on unstructured triangle meshes [J]. Computational Geometry Journal; Theory and Applications, 1999, 14(1-3): 5-24.
- [35] Botsch M, Kobbelt L. Multiresolution surface representation based on displacement volumes [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 483-491.
- [36] Botsch M, Sumner R W, Pauly M, et al. Deformation transfer for detail-preserving surface editing [C]//Proceedings of Vision, Modeling, and Visualization. Berlin, Germany: IOS Press, 2006: 357-364.
- [37] Sumner R W, Popović J. Deformation transfer for triangle meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 399-405.
- [38] Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 313-318.
- [39] Yu Y, Zhou K, Xu D, et al. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 644-651.
- [40] Zayer R, Rössl C, Karni Z, et al. Harmonic guidance for surface deformation [J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 601-609.
- [41] Alexa M. Differential coordinates for local mesh morphing and deformation [J]. The Visual Computer, 2003, 19(2): 105-114.
- [42] Lipman Y, Sorkine O, Cohen-Or D, et al. Differential coordinates for interactive mesh editing [C]//Proc. Shape modeling international. Genova, Italy: IEEE Computer Society, 2004: 181-190.
- [43] Zhou K, Huang J, Snyder J, et al. Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 496-503.
- [44] Singh K, Fiume E. Wires: A geometric deformation technique [C]//Proc. of ACM SIGGRAPH. Orlando, USA: ACM, 1998: 405-414.
- [45] Sheffer A, Krayevoy V. Pyramid coordinates for morphing and deformation [C]//Proceedings of 3D Data Processing, Visualization, and Transmission. Thessaloniki, Greece: IEEE Computer Society, 2004: 68-75.
- [46] Au O K C, Tai C L, Liu L, et al. Dual laplacian editing for meshes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(3): 386-395.
- [47] Lipman Y, Sorkine O, Levin D, et al. Linear rotation-invariant coordinates for meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 479-487.
- [48] Huang J, Shi X, Liu X, et al. Subspace gradient domain mesh deformation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 1126-1134.
- [49] Sorkine O, Alexa M. As-rigid-as-possible surface modeling [C]//Proc. of Eurographics Symposium on Geometry Processing. Barcelona, Spain: Eurographics Association, 2007: 109-116.
- [50] Au O K C, Fu H, Tai C L, et al. Handle-aware isolines for scalable shape editing [J]. ACM Transaction on Graphics, 2007, 26(3): 83(1-10).
- [51] Eigensatz M, Pauly M. Positional, metric, and curvature control for constraint-based surface deformation [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 551-558.
- [52] Gal R, Sorkine O, Mitra N, et al. iWIRES: an analyze-and-edit approach to shape manipulation [J]. ACM Transaction on Graphics, 2009, 28(3): 33(1-10).
- [53] Aguiar E D, Stoll C, Theobalt C, et al. Performance capture from sparse multi-view video [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 98(1-10).
- [54] Vlasic D, Baran I, Matusik W, et al. Articulated mesh animation from multi-view silhouettes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 97(1-9).
- [55] Noh J, Neumann U. Expression cloning [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, USA: ACM, 2001: 277-288.
- [56] Sumner R W, Zwicker M, Gotsman C, et al. Mesh-based inverse kinematics [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 488-495.
- [57] Der K G, Sumner R W, Popovic J. Inverse kinematics for reduced deformable models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 1174-1179.
- [58] Barr A H. Global & local deformations of solid primitives [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1984, 18(3): 21-30.
- [59] Blanc C. A Generic Implementation of Axial Procedural Deformation Techniques [M]. Graphics Gems: Academic Press, 1994, 5: 249-256.
- [60] Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Dallas, USA: ACM, 1986: 151-159.
- [61] Coquillart S. Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Dallas, USA: ACM, 1990, 24(4): 187-196.
- [62] Hsu W M, Hughes J F, Kaufman H. Direct manipulation of free-form deformations [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Chicago, USA: ACM, 1992: 177-184.
- [63] Floater M S. Mean value coordinates [J]. Computer Aided Geometric Design, 2003, 20(1): 19-27.
- [64] Floater M S, Kos G, Reimers M. Mean value coordinates in 3D [J]. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22(7): 623-631.
- [65] Ju T, Schaefer S, Warren J. Mean value coordinates for closed triangular meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 561-566.
- [66] Joshi P, Meyer M, DeRose T, et al. Harmonic coordinates for character articulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 71(1-10).
- [67] Lipman Y, Kopf J, Cohen-Or D, et al. GPU-assisted positive mean value coordinates for mesh deformations [C]//Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing. Barcelona, Spain: Eurographics Association, 2007: 117-123.
- [68] Lipman Y, Levin D, Cohen-Or D. Green coordinates [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10.
- [69] Chai J, Jin X, Hodgins J. Vision-based control of 3D facial animation

- [C]//Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. San Diego, USA; ACM, 2003; 193-206.
- [70] Botsch M, Kobbelt L. Real-time shape editing using radial basis functions[J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 611-621.
- [71] Botsch M, Pauly M, Wicke M, et al. Adaptive space deformations based on rigid cells [J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3): 339-347.
- [72] Sumner R W, Schmid J, Pauly M. Embedded deformation for shape manipulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 1-13.
- [73] Li H, Sumner R W, Pauly M. Global correspondence optimization for non-rigid registration of depth scans [J]. Computer Graphics Forum (Proc. SGP), 2008, 27(5): 1421-1430.
- [74] Li H, Adams B, Guibas L J, et al. Robust single-view geometry and motion reconstruction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-10.
- [75] Weise T, Li H, Gool L V, et al. FACE/OFF: Live facial Puppetry [C]// Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. New Orleans, USA; ACM, 2009; 27(5): 7-16.