

保持特征的三维网格模型尺寸调整

何 军¹⁾ 张彩明^{1),2)}

¹⁾(山东大学计算机科学与技术学院 济南 250101)

²⁾(山东经济学院计算机科学与技术学院 济南 250014)

摘 要 提出了一种三维模型尺寸调整的新方法. 新方法通过对每条边的缩放来驱动模型尺寸的调整, 然后以缩放前后三角形法向的叉乘为目标函数项进行优化, 几何意义上, 该法向叉乘项表示极小化每个三角形的法向变化; Willmore 能量意义上, 该项可以近似地极小化缩放带来的能量变化. 对需要精确保持某些特征区域的模型, 采用带约束的尺寸调整方法, 通过引入拉格朗日乘数来求解满足约束条件的优化问题, 从而能够精确保持模型的重要特征, 目前已有的三维模型尺寸调整方法还不能做到这一点. 最后, 实例表明文中方法在调整模型尺寸的同时, 既能很好地保持模型的敏感特征, 也能精确保持某些重要的模型特征.

关键词 三维模型尺寸调整; 非均匀缩放; 带约束的尺寸调整; 法向叉乘
中图法分类号 TP391 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.02014

Feature Preserving Resizing of 3D Mesh Models

HE Jun¹⁾ ZHANG Cai-Ming^{1),2)}

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Ji'nan 250101)

²⁾(School of Computer Science and Technology, Shandong Economic University, Ji'nan 250014)

Abstract This paper presents a new method for resizing 3D mesh models. The resizing is driven by scaling each edge of the mesh. And an objective function component, which is expressed as the cross product of normal vector of every triangle before and after scaling, is devised to optimize the resizing model. Its geometric meaning is to minimizing the variation of normal vector of every triangle. In the sense of Willmore energy, the cross product item can approximately minimize the variation of the Willmore energy before and after resizing. For some important featured regions of the model, whose shape should be accurately preserved, a constrained resizing method is also presented. Lagrange multiplier method is used to preserve the shape of these regions. However, existing resizing methods have not considered the accurate preserving of these important featured regions. Finally, examples are included to show that the new method can be used to resize 3D mesh models with features preserved well and important featured regions accurately preserved.

Keywords 3D model resizing; non-uniform scaling; constrained resizing; cross product of normal vectors

1 引 言

20 世纪 90 年代后期, 随着三维扫描获取技术

的发展, 数字几何模型逐渐成为一种新的数字媒体形式, 在工业制造、数字娱乐、数字文化遗产保护等方面取得了广泛的应用. 大量的三维模型被构建出来, 比如网络上的 AIM@SHAPE 模型库和 3D

收稿日期: 2009-07-15; 最终修改稿收到日期: 2009-08-27. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2009AA01Z304)、国家自然科学基金(60673003, 60603077)和山东自然科学基金(Z2006G05)资助. 何 军, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为计算机辅助几何设计、计算机图形学. 张彩明(通信作者), 男, 1955 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机辅助几何设计、计算机图形学、医学图像处理. E-mail: czhang@sdu.edu.cn.

CAD Browser 模型库以及普林斯顿大学的 3D 在线模型检索系统. 在丰富的模型资源中, 三角网格模型因其结构简单、表达能力强、直观易用等优点成为使用最广泛的模型格式. 随着各种模型库的建立和逐渐充实, 在设计工作中, 如果能够有效地利用已有的这些模型资源, 无疑会大大提高设计效率. 但是, 要找到一个完全符合应用要求的模型并不容易, 可能仅仅因为尺寸不符合要求, 已有的三角网格模型就不能直接拿来使用. 比如: (1) 由于应用场景的改变, 一个模型必须改变尺寸适应场景的要求后才能使用; (2) 基于实例的建模^[1]中, 从模型库中找到匹配的部件后, 通常其各部件的尺寸并不匹配. 这都需要对已有模型进行尺寸调整以满足具体应用的要求. 当然, 在调整尺寸的同时, 模型的主要特征需要尽量得到保持或者某些重要特征需要精确满足特定的要求, 这也就是带约束的模型尺寸调整问题. 比如, 在对零件进行尺寸调整的同时, 保证该零件和其它零件的兼容性就是一个常见的应用需求.

关于模型尺寸调整, 最直观的思路是沿模型的长、宽或者高方向对模型直接进行均匀缩放, 使之满足目标尺寸要求. 但是, 如图 1(b) 所示, 将模型沿 Z 方向均匀缩放 1.5 倍后, 模型下面的球形特征被扭曲. 可见, 从感知的角度来说, 人对模型各部位的感知是不均匀的, 有的区域会得到更多的注意, 因此人对于这里发生的扭曲很敏感, 缩放的时候就需要对这些区域特别关注, 这就需要对模型做非均匀的缩放. Kazhdan 等^[2]提出了各向异性缩放的概念, 但是, 在每个缩放方向上(沿 X, Y 或 Z 轴), 仍然是均匀缩放, 因此不便于保持模型的敏感区域特征. Vladislav 等^[3]于 2008 年首次提出对三维模型进行内容相关的尺寸调整问题. 该方法着重保持感知敏感区域的特征, 将尺寸变化带来的变形或者扭曲尽量分布到模型的非敏感区域, 取得了比较好的效果. 但是, 该方法不能精确保持模型的特征. 在精确性要求较高的工程应用中, 仍然不能满足需要.

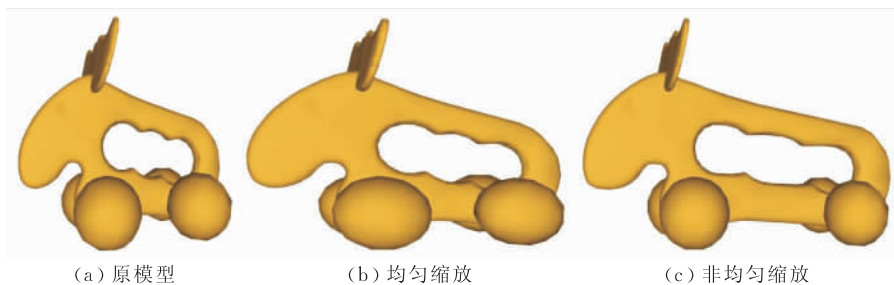


图 1 麋鹿模型沿 Z 轴的缩放

本文提出一种新的保持模型特征的尺寸调整方法, 可以很好地保持模型的感知敏感区域的特征, 将变形尽量分布到非敏感区域. 同时, 对于有精确要求的工程应用, 通过带约束的模型尺寸调整方法, 针对这些特征引入硬约束, 这样在对模型尺寸变化的同时, 模型的指定特征能够精确地满足给定的条件, 从而可以很好地满足实际应用的要求.

本文的主要工作: (1) 采用缩放前后面片的法向叉乘作为新的模型缩放的优化项; (2) 提出带约束的模型尺寸调整方法, 通过引入拉格朗日乘数求解满足约束条件的优化问题, 从而可以精确保持模型的重要特征. 本文第 2 节介绍模型尺寸调整的相关工作; 模型尺寸调整问题的具体描述在第 3 节给出; 第 4 节具体讨论新的尺寸调整方法, 包括基本思想和目标函数; 关于带约束的模型尺寸调整将在第 5 节中讨论; 第 6 节给出实验结果和分析; 最后, 结论和进一步的工作在第 7 节中讨论.

2 相关工作

三维模型的尺寸调整, 本质上是一种特殊的模型变形方式. 目前主要的网格模型变形方法有基于空间的变形、基于表面的变形、多分辨率的变形等. 早期的变形方法都是假设模型由同一种材料组成, 变形是均匀分布的. 因此, 为了有效地处理包含多种材料属性的模型, 又引入了材料相关的模型变形方法^[4-6], 根据材料属性的不同, 变形在模型上的分布是非均匀的. 但是, 使用现有的变形方法对模型进行非均匀缩放, 不仅需要施加复杂的约束条件, 还要指定相应的材料属性等等, 操作过程通常是比较繁琐的. 因此, 这就有必要对模型的缩放问题进行专门的研究.

最近, 在图像和视频领域, 内容相关的尺寸调整已经得到广泛的关注和研究^[7-11]. Avidan 等^[7]展示

了通过将误差分布到有限的“缝”集合,图像的大部分像素维持不变从而使图像的整体得以保持.与此相反,Gal等^[8]提出的方法采用全局的观点使误差在所有像素内分布.这样的全局观点使得图像的重要区域可以旋转或者均匀缩放,从而将误差尽可能地分布到非重要区域.

2008年,Vladislav等^[3]将内容相关的图像尺寸调整推广到三维网格模型,提出了一种基于空间的非均匀尺寸调整方法.首先将网格模型嵌入到保护性格中;接下来基于面的slippage敏感性分析和法曲率,确定每个格的缩放因子;然后将模型的整个格缩放到指定大小;最后,重新计算得到新的网格模型.最近,Wang^[12]等基于表面的变形方法,也提出一种内容相关的三维模型尺寸调整方法.该方法通过边的敏感性分析(也是根据slippage和法曲率),确定每条边的可伸缩性,采用迭代的方法逐步将模型缩放到指定的大小,将缩放带来的变形主要分布在非敏感的部分.这两种方法,能够在一定程度上保持模型的敏感区域,但是都不能精确保持某些特征,这使其应用受到很大的局限.

对网格曲面的约束变形问题,Masuda等^[13]基于表面的变形方法,由用户提供重要性映射,从而将扭曲变形分散到整个模型.在变形中,通过硬约束保持某些重要的Form features及其可能的共线、共面关系.

对带约束的Nurbs曲面缩放最初的方法是Zhang等^[14]提出的Attach-and-Deform方法.该方法先把原曲面按要求进行缩放,然后把要保持的特征附加到已缩放的曲面上.附加特征的操作会使已缩放的曲面产生变形,为了保证这个变形最小,使用了一个目标函数.该方法效果不甚理想,所允许的放大倍数很小,且曲面特征不能保持完全不变.2001年,Zhang等^[15]提出了Fix-and-Stretch方法,该方法能够允许更大的放大倍数,且可以保证要保持的特征完全不变.该方法的基本思想是先将给定曲面上含有特征和剪切曲线(trimming curve)的区域固定住,再延展曲面的其余部分,使其和靠近边界的部分平顺地过渡.伯彭波等^[16]采用一个完全基于几何概念的新的目标函数——导矢叉乘目标函数.该目标函数在导矢叉乘平方的积分意义下,保证了两曲面在各点的法向尽可能地接近,从而在高光线意义下保证了新、旧曲面的形状最为接近.上述几种带约束的Nurbs曲面缩放可以保持曲面上含有特征和剪切曲线的区域形状不变,但是,对其余区域采用的

是均匀缩放的方法,而且,这些方法还没有用于网格的缩放.

3 问题描述

三角网格模型可表示为 $M=(V,E,F)$,其中 V 为顶点集合, E 为边的集合, F 为三角形面片集合.给定一个三角网格模型以及模型上需要保持的重要特征集合 C , C 主要包括用户交互指定的需要精确保持的重要特征区域或者特征线、边等.本文的目标是对该模型进行尺寸调整,通过沿长宽高方向做适当的缩放来实现.缩放后的模型为 $M'=T_s M$.要求 M' 能够保持模型的形状特征,而且对于 C 中的重要特征则要精确满足.这里, T_s 是模型的整体缩放因子:

$$T_s = \langle S_x, S_y, S_z \rangle,$$

其中, S_x, S_y 和 S_z 分别是 X, Y, Z 方向的缩放因子.这里假定这3个坐标轴方向与模型的长宽高3个方向一致(如果不一致,可先进行坐标变换).因此,本文只考虑沿坐标轴方向对模型进行缩放.

4 模型的尺寸调整

三角网格模型由点、边及面构成,对模型调整尺寸,其直接表现就是每条边的边长和每个三角形面片的面积都发生了一定比例的缩放.反过来考虑,如果对网格中的每条边(或者每个三角形面片)都进行缩放,那么必然导致模型整体尺寸发生变化,从而达到调整尺寸的目的.基于这个简单的观察,本文方法通过对网格的每条边进行一定比例的缩放,从而驱动整个模型的尺寸调整.例如,每条边都放大2倍,其结果也就是整个模型放大了2倍.

由引言的讨论,人对于模型各部位的感知是不均匀的,为了保持模型的敏感区域,就需要对模型进行非均匀的缩放.也就是说,在模型的缩放中,模型的每条边都有一个缩放因子.那么,如何为每条边选择合适的缩放因子呢?对此,Wang等^[12]最近提出将每条边视为一根弹簧,使用模型的每条边因缩放而产生的弹性能量做最小二乘,从而优化得到缩放后的模型.其基于边定义的弹性能量缺乏从整体上反映模型网格表面变化的能力.因此,本文提出以缩放前后三角形面片的法向叉乘作为目标函数进行优化,在几何意义上,该目标函数可以极小化三角形面片的法向变化;在Willmore能量意义上,使用本文

方法,可以优化模型缩放带来的能量变化.注意,本文方法不能精确地极小化缩放带来的能量变化,这是因为本文采用的 Willmore 能量并非曲面精确能量,而极小化 Willmore 能量变化本身也会导致非线性问题,而本文方法只是近似的线性化的方法.

考虑到边长和法向均与几何位置无关,因此通过添加顶点位置约束来确定模型的位置.综上所述,本文使用如下目标函数对模型进行缩放

$$E_{\text{total}} = \alpha E_{\text{scale}} + \beta E_{\text{nv}} + \gamma E_{\text{pos}} \quad (1)$$

其中, E_{scale} 是边缩放项, E_{nv} 是极小化三角形面片的法向叉乘项, E_{pos} 是顶点位置约束项, α, β, γ 分别是 3 项所占的权重,第 6 节中对如何确定这些权重进行了讨论.

4.1 边缩放项 E_{scale}

E_{scale} 的目的是驱动模型的缩放,方法是通过网格的每条边进行缩放,其表达式如下:

$$E_{\text{scale}} = \sum_{i \in E} \left\| \frac{(\mathbf{v}'_{i0} - \mathbf{v}'_{i1}) - T_i(\mathbf{v}_{i0} - \mathbf{v}_{i1})}{(\mathbf{v}_{i0} - \mathbf{v}_{i1}) + \epsilon} \right\|^2 \quad (2)$$

其中, $\mathbf{v}_{i0}, \mathbf{v}_{i1}$ 和 $\mathbf{v}'_{i0}, \mathbf{v}'_{i1}$ 分别是网格边 e_i 缩放前后的两个端点. ϵ 是扰动项,用来避免出现分母为零的情况(本文使用 $\epsilon = 10^{-6}$),这是因为具体缩放过程中是对 T_i 的逐个方向依次进行缩放的,因而在某个方向上的边长可能出现零值的情况.

事实上, E_{scale} 的定义中,式(2)使用的是衡量每条边在缩放方向上的变化误差情况.通过引入原边长做分母,误差度量中使用的是相对误差,从而对网格中较长的边和较短的边都能起到同等的约束作用,因而用于不均匀网格模型(本文中边长相差较大的模型)时,也能得到很好的结果.

4.2 法向叉乘项 E_{nv}

顾名思义,式(1)中的法向叉乘项 E_{nv} 可表示如下:

$$E_{\text{nv}} = \sum_{i \in F} \left\| \frac{\mathbf{N}'_{f_i}}{A_{f_i}} \times \mathbf{N}_{f_i} \right\|^2 \quad (3)$$

其中, A_{f_i} 是原模型中面片 f_i 的面积, \mathbf{N}_{f_i} 是缩放前面片 f_i 的单位法向,缩放后的法向 $\mathbf{N}'_{f_i} = \mathbf{e}'_{01} \times \mathbf{e}'_{02}$, \mathbf{e}'_{jk} ($j=0,1,2; k=0,1,2$) 是三角形 f_i 的一条边.注意,这里的 \mathbf{N}'_{f_i} 并非单位向量,所以使用 A_{f_i} 做近似单位化.

如果同时对模型进行 X, Y 和 Z 方向的缩放,会导致非线性问题.因此,本文方法每次仅对某一方向使用相应的缩放因子分别进行缩放.这样,问题就简化为将模型在某一方向上进行缩放.比如,在 Z 方向上进行缩放为例,这时,

$\mathbf{N}'_{f_i} = (\mathbf{v}'_{i1} - \mathbf{v}'_{i0}) \times (\mathbf{v}'_{i2} - \mathbf{v}'_{i0})$
 $= (y_{01}z'_{02} - y_{02}z'_{01}, z'_{01}x_{02} - z'_{02}x_{01}, x_{01}y_{02} - x_{02}y_{01})$,
 因此只有 z'_{01} 和 z'_{02} 中含有未知数 z'_0, z'_1 和 z'_2 . \mathbf{N}'_{f_i} 可简记为 $(N'_{ix}, N'_{iy}, N'_{iz})$, \mathbf{N}_{f_i} 简记为 (N_{ix}, N_{iy}, N_{iz}) , 从而,式(3)可整理如下:

$$E_{\text{nv}} = \sum_{i \in F} \left\| \left(\frac{(N'_{iy} \times N_{iz} - N_{iy} \times N'_{iz})}{A_{f_i}}, \frac{(N'_{iz} \times N_{ix} - N_{iz} \times N'_{ix})}{A_{f_i}}, \frac{(N'_{ix} \times N_{iy} - N_{ix} \times N'_{iy})}{A_{f_i}} \right) \right\|^2$$

$$= \sum_{i \in F} \left(\frac{(N'_{iy} \times N_{iz} - N_{iy} \times N'_{iz})}{A_{f_i}} \right)^2 + \left(\frac{(N'_{iz} \times N_{ix} - N_{iz} \times N'_{ix})}{A_{f_i}} \right)^2 + \left(\frac{(N'_{ix} \times N_{iy} - N_{ix} \times N'_{iy})}{A_{f_i}} \right)^2$$

因此,可以通过解线性方程组求解.同理,可沿 X 和 Y 方向进行缩放.

4.2.1 E_{nv} 的几何意义

从几何意义上来说, E_{nv} 实质上就是极小化法向的变化.两个法向量的叉乘

$$\|\mathbf{n}' \times \mathbf{n}\| = \|\mathbf{n}'\| \cdot \|\mathbf{n}\| \sin(\theta),$$

θ 是两向量的夹角,在缩放的过程中 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$.图 2

是一个二维的示例,对线段 ab 沿 X 轴拉伸(即在 X 轴上放大)得到 $a'b'$,其法向的夹角为 θ ,显然 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$,同理三维空间中,沿某一轴方向缩放时,三角

形的法向变化角度满足 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$.在此区间内,

$\sin(\theta)$ 是单调的.又由于两个向量一个是单位向量,一个是准单位向量(因为使用原三角形面积进行了近似单位化),所以,极小化两个向量的叉乘,也就是要是其夹角 θ 极小.而且, $\sin(\theta)$ 对于 θ 的较小的变化非常敏感,因此可以有效地极小化法向的变化.

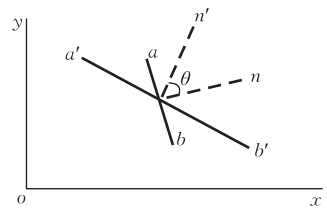


图 2 2 维空间中线段 ab 缩放到 $a'b'$ 的法向变化示例

进一步的,在几何意义上,法向叉乘的目标函数优化项有如下特点:

(1) E_{nv} 是缩放无关的.将一个模型整体缩放 s

倍,其每个三角形面片的法向不变,因此 E_{nv} 为零;

(2) 可以较好地保持模型的特征. 一般地说,模型上法向的变化能够较好地反映模型的特征^[17];而且,法向对尖锐特征和高曲率区域更加敏感;

(3) 能够较好地保持模型的高光线特性. 工业设计中,高光线模型^[18]是常用的检测曲面光顺性的重要工具,而高光线模型也是利用了曲面的法向会放大曲面的不光顺性. 因此,极小化缩放前后网格模型中每一个面片的法向变化,能够较好地保持模型的高光线特性.

4.2.2 从曲面能量观点看 E_{nv}

本节根据 Willmore 能量进行分析,说明 E_{nv} 可以近似地极小化缩放前后模型的 Willmore 能量变化.

对一个三角形网格,在属于 v_i 的网格表面上,总的绝对平均曲率^[19]为

$$|\bar{H}_i| = \int_{A_i} |H_i| = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^d \|\mathbf{e}_j\| |\beta_j| \quad (4)$$

其中, $|H_i|$ 是 v_i 点处的绝对平均曲率(即平均曲率的绝对值), d 为 v_i 的度数, \mathbf{e}_j 是与 v_i 邻接的边, β_j 是共享边 \mathbf{e}_j 的两个三角形面片法向的夹角, A_i 为属于 v_i 的网格表面面积,可定义为 v_i 的所有邻接三角形面积总和的三分之一. 易得 v_i 点处的绝对平均曲率为

$$|H_i| = |\bar{H}_i| / A_i \quad (5)$$

三角网格表面的离散 Willmore 能量^[20]可以定义为

$$E = \sum_{i \in V} H_i^2 A_i \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)整理可得

$$E = \sum_{i \in V} \left(\sum_{j=1}^d \|\mathbf{e}_j\| |\beta_j| \right)^2 / 16A_i \quad (7)$$

注意到,将上式的分子部分展开,主要含有如下两种类型

$$\frac{\|\mathbf{e}_j\|^2 |\beta_j|^2}{16A_i}, \quad \frac{\|\mathbf{e}_j\| \|\mathbf{e}_k\| |\beta_j| |\beta_k|}{16A_i} \quad (8)$$

其中, $1 \leq k \leq d$ 且 $k \neq j$. 注意到式(8)中分子含有边长的平方项或者乘积项,而分母中含有面积项,如果 v_i 的邻接边长度差别不大, $A_i = d \|\mathbf{e}\|^2 \sin(\theta) / 6$, 约去边长的平方项,分母上剩下 $\sin(\theta)$ 项,而 θ 在 $\pi/2$ 左右时 $\sin(\theta)$ 的变化不敏感. 即如果 A_i 可由 v_i 的邻接边长度的平方来近似表示,那么随着缩放项 E_{scale} 开始驱动对模型进行缩放,极小化邻接的两个三角形法向的夹角变化,就可以近似地极小化模型缩放的能量变化. 但是,法向夹角的约束优化是非线性问

题,将其转变为极小化每个三角形面片的法向变化最小. 因此,本文采用的方向叉乘项 E_{nv} 可以近似地极小化缩放前后模型的 Willmore 能量变化.

4.3 位置项 E_{pos}

本文方法是按 T_s 的各个缩放轴 S_u , $u = x, y, z$ 方向依次进行缩放. 因此,首先找出沿坐标轴方向的包围盒,假设其左下角和右上角的两个顶点分别是 \mathbf{v}_{min} 和 \mathbf{v}_{max} ; 然后选择在 u 方向上包围盒一端的顶点,其选取条件是 $(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{min}) \cdot \mathbf{u} \leq \epsilon'$, 其中 \mathbf{u} 是缩放方向向量, ϵ' 使用 10^{-12} 即可,选取的约束顶点记为 \mathbf{b}_i ($i = 1, 2, \dots, p$). 最后添加位置约束

$$E_{pos} = \sum_{i=1}^p (u_{b'_i} - u_{b_i})^2 \quad (9)$$

其中, u_{b_i} , $u_{b'_i}$ 分别是缩放前后 \mathbf{b}_i 的 u 轴坐标.

4.4 缩放到指定尺寸

虽然式(2)中使用目标缩放因子 T_s 对边长进行了缩放,但是,由于法向叉乘项 E_{nv} 的约束优化作用,对初始模型缩放一次一般不能满足目标尺寸要求. 为此,本文采用迭代方法,就是通过迭代找到合适大小的边缩放因子.

为简化问题的讨论,假定沿 u 方向进行缩放,第一次缩放使用该方向上的目标缩放因子 S_d . 缩放后,通过计算包围盒的缩放,得到模型的实际缩放倍数 S'_1 . 对第 n 次缩放,可以建立如下关系

$$\frac{S_n}{S'_n} = \frac{S_{n+1}}{S_d} \quad (10)$$

其中, S_d 为目标缩放因子, S_{n+1} 为下一次缩放所需的缩放因子. 要达到实际缩放 S_d 倍,则 $S_{n+1} = \frac{S_n \times S_d}{S'_n}$.

然后,以令 $S = S_{n+1}$ 为缩放因子再次进行缩放.

迭代多次,当达到 $|S' - S_d|$ 小于某一阈值(本文使用 0.01)或者迭代达到一定次数以后,停止迭代.

5 带约束的模型尺寸调整

对模型的重要特征集合 C 中某一个特征(一条特征边或线,或者一个特征区域等),本文使用模型顶点集合 \mathbf{c}_i ($i = 0, 1, 2, \dots, m$) 来表示. 因此,要保持该特征不变,只需要对该顶点集合中的网格顶点添加约束条件,保持它们之间的相互距离. 一个特征区域至少包含 2 个顶点(一条特征边),本文通过保持顶点间的相对位置来保持特征不变,因此,特征的形状约束条件如下

$$\mathbf{c}'_i - \mathbf{c}'_0 = \mathbf{c}_i - \mathbf{c}_0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

如果要对特征区域也进行指定的缩放,缩放因子为 s , 比如一个圆区域整体放大 1.5 倍, 那么式(11)可扩展为

$$\mathbf{c}'_i - \mathbf{c}'_0 = s(\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_0), \quad i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

注意, 本文方法将缩放 T_s 分解为依次沿某一轴进行缩放, 因此这里只需考虑沿某一轴 u 缩放的情况.

在缩放中, 要在精确满足式(12)所示约束条件的基础上对式(1)进行极小化, 本文通过引入拉格朗日乘数将式(12)和式(1)结合起来

$$E = E_{\text{total}} + \lambda_i (\mathbf{c}'_i - \mathbf{c}'_0 - s(\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_0)) \quad (13)$$

然后求解得到满足约束条件的缩放结果. 特征集合 C 中每一个特征都可以如此处理. 然后, 使用与 4.4 节的迭代方法将模型缩放到指定尺寸. 本文通过保持特征区域顶点间的相对位置来实现模型特征的保持, 因为模型的特征区域是模型的局部, 而且硬约束条件的个数少于特征区域中的顶点数, 因此硬约束条件的添加不会导致方程无解.

6 实验结果及分析

具体实现中, 需要确定式(1)中的 3 个权重: 令 $\beta=1$, 那么只需确定 α, γ 即可. 为了使 E_{scale} 在驱动缩放的同时能够更好地保持特征, α 需要仔细确定, 本文实验中使用 $\alpha=0.1$ 取得了比较好的结果. 另外, 在缩放中, 更加侧重的是模型的尺寸而非位置, 因此, 对 E_{pos} 加一个比较大的权重即可, 本文使用 $\beta=10^4$. 注意, 本文中模型缩放到指定尺寸是通过迭代方法进行的. 在实验中, 使用上述确定参数, 各个例子的迭代次数都不超过 10 次, 具体的运行时间及迭代次数请参见表 1.

表 1 运行时间和迭代次数

模型	顶点数	缩放因子 (缩放轴)	运行时间/s	迭代次数
麋鹿	1645	1.5(Z)	0.296	10
猪	3522	1.5(X)	0.569	9
钩子	6970	1.2(Z)	0.577	4
零件模型 1	6266	0.7(X)	0.714	6
零件模型 2	2132	1.5(Z)	0.141	3
沙发 $\alpha=0.1$	4002	2(X)	0.560	7
沙发 $\alpha=1$	4002	2(X)	0.264	3

“猪”模型是一个扫描模型, 图 3 是对该模型进行缩放的结果. 可以看到, 对人的感知而言, 猪的尾巴、鼻子、下腹部, 还有腿部都比猪的躯干要敏感. 在尺寸调整中要着重保持这些敏感区域. 显然, 均匀缩

放的方法产生的扭曲最大, 上述敏感区域都发生了很大的扭曲. Wang^[12]方法对于猪的尾巴、鼻子和脚保持的较好, 但是在下腹部、腿的上部也发生了扭曲. 最后, 本文方法对上述敏感区域保持的很好.

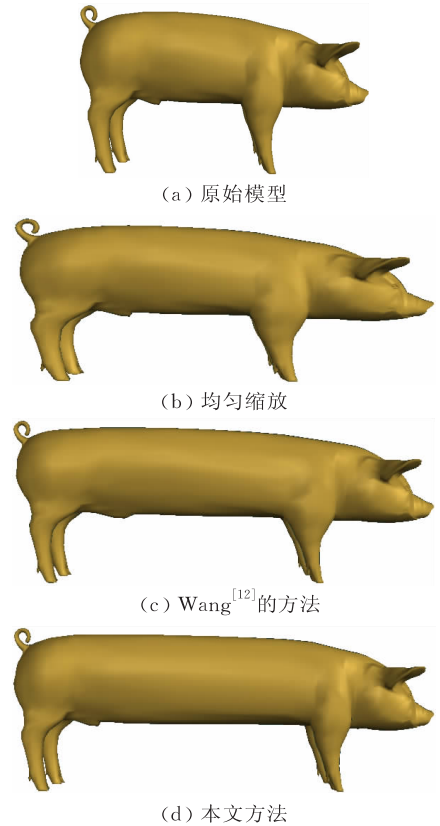


图 3 对“猪”模型沿 X 轴放大为原来的 1.5 倍

第 2 个例子是一个零件模型, 见图 4. 零件的“头部”是圆的而且有个圆孔, 显然这是该模型的敏感区域. 从图 4 中可以看到, 除了均匀缩放, 另两种方法均较好地保持了“头部”, 但是, 图(c)中可以看到其“颈部”发生了扭曲变形.

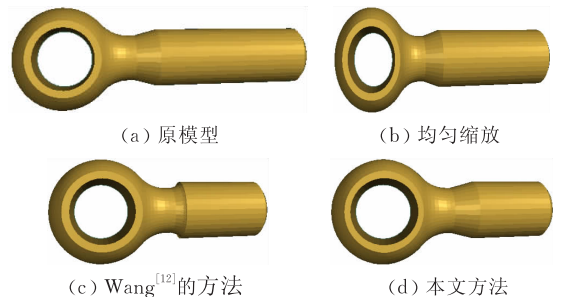


图 4 对一个零件模型 1 沿 X 轴缩小为原来的 0.7 倍

图 5 是一个钩子模型沿 Z 轴缩放的结果, 本文方法较好地保持了钩子的形状. 图 6 是 α 取不同值的例子. 如图 6(c) 所示, $\alpha=1$ 时沙发左右两端的扶手也明显变宽了, 这与均匀缩放的结果比较相似. 而

实际上,由式(1)可知, $\beta=1$ 时, α 越大,则说明在 E_{total} 中边缩放项 E_{scale} 所占的比例越高,从而,缩放的结果越接近于进行均匀缩放的结果.同时,一般地说,对同一个模型而言, α 越小,所需的迭代次数越多.

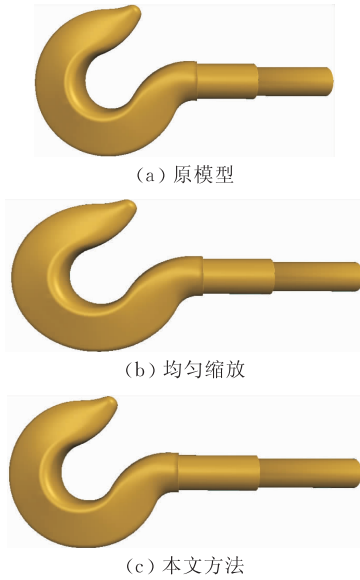


图 5 对“钩子”模型沿 Z 轴放大为原来的 1.2 倍

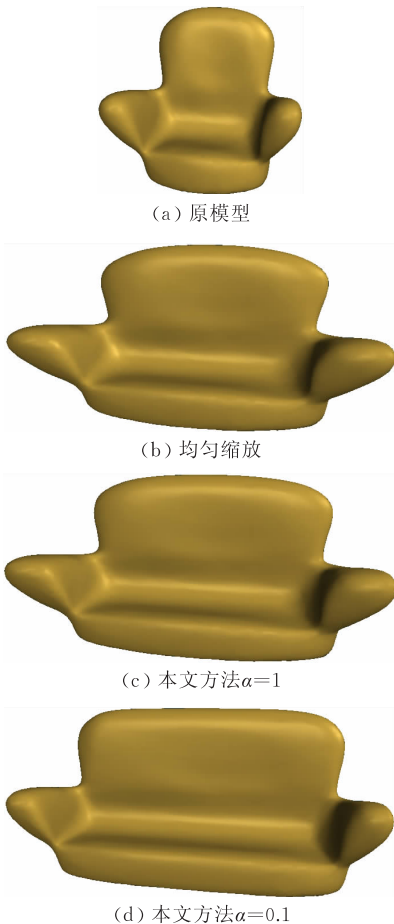


图 6 对“沙发”模型沿 X 轴放大为原来的 2 倍

图 7 是另一个零件模型的例子,其中圆孔、正方形块都可能是重要特征,比如要与其它零件相兼容.可以看到,仅仅使用式(1)对它进行缩放,只能说形状大体上保持的还可以,圆孔保持的还算凑合,正方形块则整个被拉长了.为了保持这些重要特征,就要进行带约束的模型尺寸调整(即使用式(13)进行求解).选择圆孔的尖锐边作为必须保持不变的特征边,缩放结果见图 8(a);同理,选择正方形区域的尖锐边,对模型进行缩放结果见图 8(b).可见这些重要特征得到了很好的保持.而且,由于是精确保持的,该零件仍然可以保持与其他零件的兼容性.而且,本文方法还可以对所约束的特征进行缩放,实验结果见图 9.图 9(a)可由原始模型沿 Z 轴使用缩放

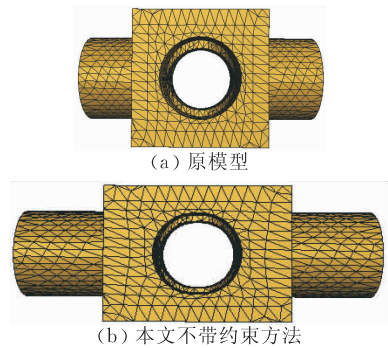


图 7 对一个零件模型 2 沿 Z 轴放大为原来的 1.5 倍

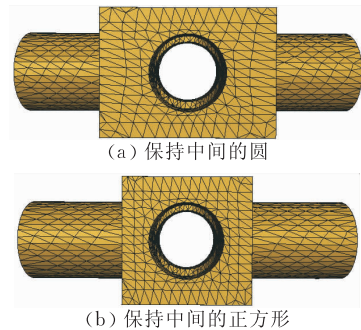


图 8 使用带约束的尺寸调整方法将模型沿 Z 轴放大为原来的 1.5 倍

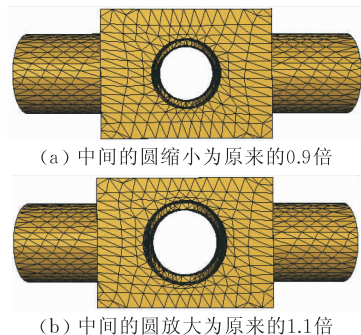


图 9 沿 Z 轴进行尺寸调整的同时对中间的圆孔进行缩放约束的结果

因子 1.5 缩放一次,再沿 Y 轴使用缩放因子 1.0 缩放一次,其中式(12)中的约束特征缩放因子使用 $s=0.9$ 。同样的方法,约束特征缩放因子使用 $s=1.1$ 可得图 9(b)的结果。

上述所有实例的运行时间和迭代次数见表 1。所有实例均是在 Core2 3.0 GHz CPU、4GB 内存 PC 上用 Visual Studio 2008 实现,求解线性方程组使用的是 Matlab engine。

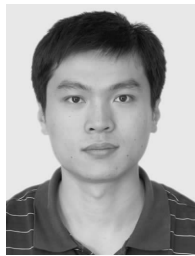
7 结论与展望

本文提出一种对三维模型进行尺寸调整的新方法,通过在长、宽、高等各个方向上的缩放来调整尺寸。该方法采用缩放前后面片的法向叉乘作为新的模型缩放的优化项,模型上的敏感区域能够得到很好的保持。进一步地,本文提出了带约束的模型尺寸调整方法,模型上重要的特征边、线或者非常重要的特征区域,可以得到精确保持。这对于模型缩放中保持与其他模型的相容性具有重要的意义。而现有的缩放方法都没有考虑这一点。

我们下一步的工作,包括进一步研究带约束的模型尺寸调整、研究如何在调整尺寸的同时使模型上的多个特征等保持特定的相互关系,比如各种对称关系等。

参 考 文 献

- [1] Funkhouser Thomas, Kazhdan Michael, Shilane Philip, Min Patrick, Kiefer William, Tal Ayellet, Rusinkiewicz Szymon, Dobkin David. Modeling by example. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2004, 23(3): 652-663
- [2] Kazhdan Michael, Funkhouser Thomas, Rusinkiewicz Szymon. Shape matching and anisotropy. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2004, 23(3): 623-629
- [3] Vladislav Kraevoy, Alla Sheffer, Ariel Shamir, Daniel Cohen-Or. Non-homogeneous resizing of complex models. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 1-9
- [4] Popa T, Julius D, Sheffer A. Material-aware mesh deformations//*Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006 (SMI'06)*. Matsushima, Japan, 2006: 22-30
- [5] Zhang H, Xu D, Bao H. Material-aware differential mesh deformation using sketching interface. *The Visual Computer*, 2008, 24(2): 85-93
- [6] Yang W, Feng J, Jin X. Shape deformation with tunable stiffness. *The Visual Computer*, 2008, 24(7): 495-503
- [7] Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 10:1-10:9
- [8] Gal R, Sorkine O, Cohen-Or D. Feature-aware texturing//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, Nicosia, Cyprus, 2006: 297-303
- [9] Wolf L, Guttman M, Cohen-Or D. Non-homogeneous content-driven video-retargeting//*Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computer Vision*. Sofitel Rio de Janeiro, Brazil, 2007: 1-6
- [10] Zhang Y-F, Hu S-M, Martin R R. Shrinkability maps for content-aware video resizing. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(7): 1797-1804
- [11] Rubinstein M, Shamir A, Avidan S. Improved seam carving for video retargeting. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 16:1-16:9
- [12] Wang K-P, Zhang C-M. Content-aware model resizing based on surface deformation. *Computers & Graphics*, 2009, 33(3): 433-438
- [13] Masuda H, Yoshioka Y, Furukawa Y. Preserving form features in interactive mesh deformation, *Computer-Aided Design*, 2007, 39(5): 361-368
- [14] Zhang P, Zhang C, Cheng F. Constrained shape scaling of trimmed NURBS surfaces//*Proceedings of 1999 ASME Design Theory and Methodology Conference*. Las Vegas, Nevada, 1999; Paper no. DETC99/DTM-8755
- [15] Zhang C, Zhang P, Cheng F. Constrained scaling of trimmed NURBS surfaces based on fix-and-stretch approach. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(1): 103-112
- [16] Bo Peng-Bo, Zhang Cai-Ming. Constrained surface scaling. *Journal of Software*, 2003, 14(14): 1806-1812(in Chinese) (伯彭波, 张彩明. 带约束的曲面放缩变形. *软件学报*, 2003, 14(14): 1806-1812)
- [17] Lai Y-K, Zhou Q-Y, Hu S-M, Wallner J, Pottmann H. Robust feature classification and editing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(1): 34-45
- [18] Beier K P, Chen Y. Highlight-line algorithm for realtime surface-quality assessment. *Computer-Aided Design*, 1994, 26(4): 268-277
- [19] Dyn N, Hormann K, Kim S J, Levin D. Optimizing 3D triangulations using discrete curvature analysis//*Proceedings of the Mathematical Methods for Curves and Surfaces*. Oslo, 2000: 135-146
- [20] Yong J-H, Deng B-L, Cheng F-H, Wang B, Wu K, Gu H-J. Removing local irregularities of triangular meshes with highlight line models. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(3): 418-430



HE Jun, born in 1982, Ph. D. candidate. His research interests include computer aided geometric design and computer graphics.

ZHANG Cai-Ming, born in 1955, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include computer graphics, computer aided geometric design, and medical image processing.

Background

As the fast development of 3D scanning techniques, 3D models have become an emerging type of digital media. 3D models are nowadays widely used in industrial design, digital entertainment and so on. More and more models are produced. In designing work, reusing existing models will greatly promote the designing efficiency. However, it is not easy to find a model which can be used directly. Usually, an existing model can not be used just because its size is not suitable. For example, (1) the scene changes, so a model should also be changed to a prescribed size; (2) in example-based modeling, the parts found in the model library are usually not matched to each other. Therefore, we have to resize existing models to fit for use.

As we know, there are two typical methods for resizing 3D models. One method is based on space deformation. It is the extension of image resizing method. Firstly, embed the input mesh into a protected grid. Then, evaluate the vulnerability of each cube and optimize the directional scaling to

obtain the desired size of each cube after scaling. Finally, obtain the scaled mesh by interpolation. Another method is based on surface deformation. The basic idea is to attach a spring to each edge and the coefficient of each spring is related to its local sensitivity. The edge sensitivity is determined by edge-based slippage analysis and normal curvature analysis. The two methods can protect the sensitive region of the model. However, they can't preserve the shape of some features exactly. Therefore, the authors present a constrained resizing method. The sensitive regions of the model can be protected and the important features can also be preserved exactly.

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (No. 2009AA01Z304), National Natural Science Foundation of China (Nos. 60673003, 60603077) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. Z2006G05).