

基于变分隐式曲面的网格融合*

万华根[†], 金小刚, 刘刚, 冯结青, 彭群生

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Mesh Fusion Based on Variational Implicit Surfaces

WAN Hua-Gen[†], JIN Xiao-Gang, LIU Gang, FENG Jie-Qing, PENG Qun-Sheng

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

+ Corresponding author: Phn: +86-571-88206681 ext 512, E-mail: hgwan@cad.zju.edu.cn, <http://www.cad.zju.edu.cn>

Received 2003-10-14; Accepted 2005-02-03

Wan HG, Jin XG, Liu G, Feng JQ, Peng QS. Mesh fusion based on variational implicit surfaces. *Journal of Software*, 2005,16(11):2000–2007. DOI: 10.1360/jos162000

Abstract: 3D object fusion provides an easy way to generate novel models from two or more existing geometric models by using 3D cutting and pasting operations. As a new kind of geometric modeling tool, it is now attracting much more attention. In this paper, a new montage mesh fusion method based on variational interpolating implicit surfaces is proposed. The approach first calculates mesh regions to be fused by cutting original meshes with boundless planes, then constructs a variational implicit surface by interpolating mesh regions to be fused and polygonalizes the implicit surface to obtain a blending surface between/among original meshes to be fused. Smooth mesh fusion is finally obtained by cutting away unwanted portions of the blending surface and performing topology merging operations. Compared with current methods that fuse mesh objects by directly connecting mesh regions to be fused, this approach has the advantages of no restriction on topologies of the mesh regions to be fused, and thus enabling the fusion among multiple objects, fast running speed with robustness, and easiness to use. The approach shows a promising future in applications for geometry modeling as well as computer animation.

Key words: mesh fusion; variational implicit surface; topology merging; geometry modeling; animation

摘要: 三维物体融合利用三维模型之间的剪贴操作从两个或多个现有的几何模型中光滑融合出新的几何模型。作为一种新的几何造型方法,它正受到越来越多的关注。提出一种基于变分隐式曲面的网格融合新方法。首先利用平面截面切出网格物体的待融合边界,然后通过构造插值待融合网格物体边界的变分隐式曲面并对其

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60273054, 60340440422 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312101 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Fok Ying Tung Education Foundation under Grant No.91069 (国家教育部霍英东教育基金); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20020335070 (国家教育部博士点基金)

作者简介: 万华根(1968 -),男,江西南昌人,博士,副研究员,主要研究领域为计算机动画,虚拟现实,科学计算可视化;金小刚(1969 -),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为空间变形技术,隐式曲面造型,计算机动画,计算机真实感图形;刘刚(1978 -),男,硕士,主要研究领域为计算机动画;冯结青(1970 -),男,博士,研究员,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机辅助几何设计,计算机图形学;彭群生(1947 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机真实感图形,虚拟现实,红外成像仿真,多光谱信息融合,计算机动画,科学信息可视化。

进行多边形化,得到待融合网格物体间的过渡曲面,最后通过剪切掉过渡曲面的多余部分及拓扑合并操作以实现过渡网格曲面与原始网格间的光滑融合.与现有的直接连接待融合网格物体边界以实现网格融合的算法相比,该方法不仅突破了对待融合物体的拓扑限制,允许多个物体同时进行融合,而且算法计算快速、鲁棒,使用方便,展示出良好的应用前景.

关键词: 网格融合;变分隐式曲面;拓扑合并;几何造型;动画

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

多边形网格融合技术是从几何造型、计算机动画等领域中派生出来的新技术,其目的是针对多边形网格物体,借用现有的物体模型快速、准确地构造出兼有原始模型特点但又不同于原始模型的新模型.随着几何造型、计算机动画等领域的多年积累及三维扫描技术的发展,目前已有大量的多边形网格模型,如何利用“重用”思想,借助现有模型快速构造出新模型,对于提高设计人员创作新模型的效率,具有相当重要的现实意义.

从本质上说,可以将三维物体融合问题视为三维几何模型的“剪贴”问题,亦即从一个(或多个)物体上“剪切”出一块(或多块),然后“粘贴”到其他物体上.在三维物体上进行剪贴的思想源于特征造型领域^[1,2].Ranta 等人提出了一种针对边界表示(B-reps)模型的基于特征的设计方法^[1].该方法通过剪切模型的一部分交互定义新的特征,所剪切的结果边界特征可粘贴到其他模型中,且在粘贴过程中,可局部修改边界特征几何.由于特征剪贴的目标是解决机械产品的特征设计问题,Ranta 等人没有考虑粘贴后模型边界的光滑性问题.然而,对于一般意义上的物体融合,在进行剪贴操作时,物体粘贴边界的光滑连续性问题却是不可回避的.

解决物体粘贴边界光滑性问题的方法之一是采用隐式曲面^[3-10],比如 Pederson 提出的剪贴隐式曲面的方法^[3],但该方法只适合原始物体均为隐式曲面表示的物体.Chan 等人提出了针对 B 样条曲面的剪贴方法^[11],该方法要求原始物体均为 B 样条曲面,也不能处理多边形网格.Singh 等人提出了采用过程隐式曲面来连接多面体的方法^[12],但该方法仅适用于待融合区域为星形物体.的情形.Museth 等人提出了一种基于 level set 的曲面编辑算子来实现局部和全局封闭曲面编辑^[13],该方法可实现网格融合,但由于 level set 是一种体表示,该方法必须先把网格物体转换为体表示,处理完以后再从体表示转化回来.事实表明,这种间接方法除了速度慢以外,多次模型转换亦不可避免地导致模型细节的丧失.Biermann 等人提出了一种基于多分辨率细分曲面将特征剪切到目标区域的方法^[14],但该方法对特征和目标区域的复杂度有较强的依赖性,难以处理复杂物体间的融合问题.

相对而言,Kanai 等人提出的基于全局调和映射的网格融合是一种比较实用的方法^[15].该方法首先利用变形思想建立网格顶点之间的对应关系,然后插值对应点产生一个光滑的中间物体.为了解决对应问题,算法把一个拓扑同构于圆盘的三维网格调和映射到一个外接于单位圆的二维正多边形内^[16-19].虽然物体融合只发生在局部区域,但该方法求解过程却是全局的.若原始物体包含的点很多,求解计算量就会很大.而且由于奇异情形多,算法的稳定性难以保证.为了克服该方法的缺点,根据三维剪贴操作通常只影响局部区域的特点,刘刚等人提出了一种基于局部调和映射的网格融合算法,并提出了一种基于网格上近似等距线计算的待融合区域抽取算法^[20].

然而,上述算法或者难以处理一般多边形网格,或者虽然能对多边形网格进行处理,但却存在着严重的拓扑限制.文献[14,15]中的算法都假设待融合物体拓扑同构于圆盘,如果这个条件不满足,算法将失效,更不用说在两个不同拓扑的网格间进行融合了.文献[20]中的方法由于只进行局部网格融合,所以只需假设待融合物体的边界处能选出一个拓扑同构于环的局部区域.这在一定程度上能降低拓扑限制,但并不彻底.我们注意到,在融合物体时,既可以直接把待融合物体的边界相接,也可以在物体间加入一个与原物体光滑相连的过渡物体,只要这个过渡物体能同时满足插值待融合物体的边界且本身足够光滑的条件即可.构造过渡物体的过程实际上是一个曲面插值的过程.在本文中,我们采用变分隐式曲面进行曲面插值,这是因为变分隐式曲面方法能产生任意拓扑的光滑的封闭曲面^[10].由于采用了构造过渡物体的间接融合方法,这使得突破传统网格融合方法在拓扑上的限制,对多个复杂网格物体同时进行融合成为可能.

1 方法概述

不同于以往网格融合方法中直接连接待融合物体边界的做法,我们将网格物体的融合视为在待融合物体之间加入一个光滑插值待融合物体边界且自身足够光滑的过渡曲面的过程.为此,我们将整个网格物体融合算法分为以下3步:

- 预处理:将每一待融合物体分别用截面切出其待融合区域的边界(如图1(a)所示).

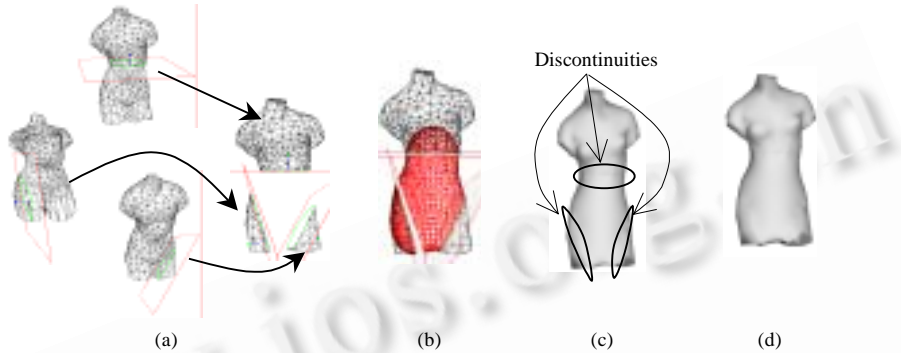


Fig.1 Schematic of our mesh fusion algorithm

图1 网格物体融合算法过程示意

- 构造中间过渡曲面:构造能插值待融合物体边界的中间过渡曲面,并将其多边形化.由于变分隐式插值曲面既能插值给定的约束点,又能产生任意拓扑的光滑曲面,因此,我们采用它作为构造中间过渡物体的工具,通过插值待融合物体边界上的顶点得到相应的隐式方程,并使用隐式曲面多边形化算法从中提取出过渡曲面(如图1(b)所示).
- 后期修正:局部修正上一步生成的过渡多边形网格.因为所定义的插值点只是待融合物体边界上的顶点,所以变分隐式曲面虽然会精确插值这些边界点,但一般不会与截面吻合,必定会有一部分超出截面,因此需要用原来的截面截过渡物体,去除过渡多边形网格中多余的部分(如图1(c)所示).同时,由于隐式曲面多边形化程序并不能总是保证所生成的多边形网格正好经过这些待融合物体边界上的顶点,还需要在边界处将过渡物体和原始物体进行拓扑合并,使其边界能无缝融合(如图1(d)所示).

2 基于变分隐式曲面的过渡曲面构造

曲面插值问题可表述为:给定 R^3 中曲面 M 上的 n 个离散点 $\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^n$, 找到一个合理插值 M 的曲面 M' . 常见的方法是用一个隐式函数 $f(x, y, z)$ 表示曲面 M' , 如分片低次代数曲面或分片参数样条曲面^[5]. 为了拟合激光扫描数据, Turk 等人尝试使用变分隐式插值曲面方法^[10]. 传统隐式曲面方法与变分隐式曲面方法的根本区别在于前者是拟合型的, 而后者是插值型的. 我们借鉴 Turk 等人的方法, 利用变分插值隐式曲面构造三维网格物体融合所需的过渡曲面, 具体分为以下3步: 建立带符号的距离函数、生成过渡隐式曲面及生成过渡曲面的多边形网格表示.

2.1 带符号的距离函数的建立

对于曲面插值问题, 我们期望找到一个隐式函数 f 以定义曲面 M' , 并且在曲面 M 上的 n 个离散点 $\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^n$ 上满足方程:

$$f(x_i, y_i, z_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (x_i, y_i, z_i) : M \text{ 上的点} \quad (1)$$

为避免得到无用解 $f \equiv 0$, 需增加不在 M 上的点, 并赋予它们非零值:

$$f(x_i, y_i, z_i) = d_i \neq 0, \quad i = n+1, \dots, N, \quad (x_i, y_i, z_i) : \text{不在 } M \text{ 上的点} \quad (2)$$

f 的一个明显选择就是带符号的距离函数,其中 d_i 代表点与曲面的最近距离.实践表明,一种好的处理方法是在曲面 M 上的点的两侧各扩充一个不在曲面 M 上的点.具体扩充方法是沿着曲面 M 法向投影一段小的距离,因此也称不在曲面 M 上的点为法向点(normal point)(如图 2 所示).当法向点在曲面 M 内部时, d_i 为正,当法向点在曲面 M 的外部时, d_i 为负.

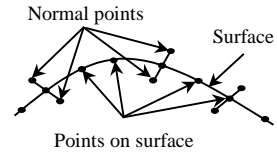


Fig.2 Construction of normal points

图 2 法向点的构造

给定一系列零值点和非零值点,曲面插值问题就变成了散乱点插值问题:给定离散节点集合 $C = \{c_i\}_{i=1}^N \subset R^3$ (c_i 代表一个约束点的几何位置)和函数值的集合 $\{f_i\}_{i=1}^N \subset R$,找到插值函数 $s: R^3 \rightarrow f_i$,使得

$$s(c_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N \tag{3}$$

对于三维网格融合问题,假设所有待融合物体的边界顶点集合为 $V = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_n^0\}$,将这些点加入约束点集合 C .由于它们是待融合网格的边界点,过渡曲面需插值这些点,所以为它们赋予距离值 0;同时,在每个边界顶点 v_i^0 的两侧沿着待融合网格的法向各增加一个法向点到集合 C 中,并将这两个顶点记为 v_i^1, v_i^2 .不妨设 v_i^1 在曲面内部,给它赋距离值 1; v_i^2 在曲面外部,给它赋距离值-1.

2.2 隐式曲面的生成

薄板插值(thin-plate interpolation)是解决上述散乱点插值问题的方法之一.考虑二维的情况:给定 k 个散乱的位于 xy 平面上的约束点 $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$,每个约束点都有一个对应的高度值 $\{h_1, h_2, \dots, h_k\}$,构造一个光滑的曲面在约束点处满足对应的高度值.定义能量函数如下:

$$E = \int_{\Omega} (s_{xx}^2 + 2s_{xy}^2 + s_{yy}^2) dx dy \tag{4}$$

该能量函数是函数 $s(x)$ 在 Ω (一般来说是平面的一部分)上的综合曲率(aggregate curvature).曲面上任何一个皱褶都会导致较大的 E 值,而没有这些高曲率区域的光滑曲面具有较低的 E 值.这个插值问题的薄板插值解需要满足所有的约束条件,并且使得结果曲面的 E 值尽可能小.因为求解上面的约束问题需要利用到数学上一个叫做变分学(variational calculus)的分支,所以薄板技术也被称作变分方法.

求解散乱点插值问题最常用的是有限元法和有限差分法.这两种方法均将区域 Ω 离散为一些小元素,并在这些元素之上定义局部基函数^[21-24].通过将基函数进行线性组合,并给每个基函数赋以合适的权值就能得到准确解或逼近解.尽管它们适用于很多问题,但由于其固有的离散属性,因此,会给最后的曲面带来瑕疵(artifact).

另一种常用的求解方法是以中心点位于约束点的径向基函数(radial basis function)的形式表达解.径向基函数是关于中心点径向对称的函数,在函数逼近中得到广泛应用.尤为重要是可通过选择径向函数来自动求解微分方程,比如说解上面有关能量的微分方程.对于二维的散乱点插值可选择下面的径向基函数:

$$\phi(r) = r^2 \log(r) \tag{5}$$

这个函数也称为薄板径向基函数.对于三维的情况,能量函数变为

$$E = \int_{\Omega} (s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2 + 2s_{xy}^2 + 2s_{xz}^2 + 2s_{yz}^2) dx dy dz \tag{6}$$

此时可以选择 $\phi(r) = r$ 作为径向基函数.由曲面插值转化而成的散乱点插值问题正可以用这种基于径向基函数的方法来求解:

$$s(x) = p(x) + \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(|x - c_j|) \tag{7}$$

其中 p 是一个低次多项式, c_j 是约束点的位置,也称径向基函数的中心点. λ_j 是每个基函数的权.当选择 $\phi(r) = r$ 作为基函数时, p 是一个一次多项式,用来组成函数 s 的线性和常量部分,具有下面的形式:

$$p(x) = p_0 + p_1 x + p_2 y + p_3 z \tag{8}$$

通过求解 λ_j 和函数 p 的系数就可以构造出既精确插值约束点又最小化能量函数的函数来.为了解出 λ_j 和函数 p ,将方程式(3)代入式(7)中得到:

$$f_i = p(c_i) + \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(|c_i - c_j|) \quad (9)$$

由于这个方程只是关于未知数 λ_j 及函数 p 的系数的线性方程,所以可以作为一个线性系统进行求解.假设约束点 c_i 的坐标为 (c_i^x, c_i^y, c_i^z) , 并记 $\phi(|c_i - c_j|)$ 为 ϕ_{ij} , 则方程式(9)可用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} & 1 & c_1^x & c_1^y & c_1^z & \lambda_1 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} & 1 & c_2^x & c_2^y & c_2^z & \lambda_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} & 1 & c_N^x & c_N^y & c_N^z & \lambda_N \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_0 \\ c_1^x & c_2^x & \cdots & c_N^x & 0 & 0 & 0 & 0 & p_1 \\ c_1^y & c_2^y & \cdots & c_N^y & 0 & 0 & 0 & 0 & p_2 \\ c_1^z & c_2^z & \cdots & c_N^z & 0 & 0 & 0 & 0 & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将第 2.1 节中建立的约束点集合 C 中的所有元素和对应的距离值代入方程式(10)中,即可求出相应的描述过渡曲面的隐式函数.这一隐式曲面即是所谓的基于径向基函数的变分隐式曲面,目前已广泛应用于曲面的表示与重建、形状过渡、虚拟雕刻等领域中^[10].

可以看出,方程式(10)所描述的线性系统是对称且半正定的,因此存在唯一解.需要注意的是,其中矩阵的条件数会随着约束点数量的增加而增加,这会增加系统的不稳定性.然而,在我们的三维网格融合的应用中,约束点总是选为待融合物体边界上的点,数目不会太大,自然,矩阵的条件数也不大,因此一般不会影响过渡曲面的生成.

2.3 过渡曲面的多边形网格表示

一旦得到光滑过渡曲面的隐式方程,即可利用一般的隐式曲面多边形化算法,从隐式方程中通过抽取等值面生成过渡曲面的多边形网格表示.我们采用的是 Bloomenthal 提出的隐式曲面多边形化算法^[25].

3 算法前期及后置处理

3.1 截面与网格物体的快速求交

对于待融合的网格物体而言,为了截出其待融合的边缘,必然涉及到大量的截面与多边形的求交计算.如果盲目地将截面与多边形网格上的每一个面逐一进行求交,必将导致大量不必要的计算.

不妨假设截面为无穷平面,并假设所采用的网格模型为三角形网格,那么截面与三角形网格的交必然会形成一个或多个多边形(我们将每个这样的多边形称为原始轮廓),并且在截面与原始轮廓之间的对应关系既可能是一对一,也可能是一对多.因此,期望自动计算出所有的截面与三角网格的交点,并将这些交点分类到每个原始轮廓不仅有一定的难度,而且会不可避免地引入无谓的计算.因此,为了快速、鲁棒地解决复杂稠密网格与截面求交的问题,我们在求交初始阶段采取了用户干预的做法,以便在求交的过程中自动根据网格拓扑关系进行跟踪,大幅度节省求交计算时间.具体做法如下:首先,通过观察,由用户在每个所需的原始轮廓附近拾取一条一定与截面相交的种子边,进而利用种子边得到一个与截面相交的三角形(我们把这个三角形称为种子三角形),借助种子三角形,即可方便地进行求交的局部计算以及原始轮廓对应顶点的自动跟踪.如图 3 所示,图 3(a)是待融合三角形网格模型与截面,其中箭头所指的线段表示截面法向;图 3(b)中箭头所指的线段表示所拾取的种子边;图 3(c)中箭头所指的线段表示所求出的原始轮廓,即待融合的网格边界之一.

由于采用了基于种子边引导的求交算法,求交计算得以局部化,且交点与原始轮廓的对应关系可自动跟踪得到,从而保证了截面与待融合网格的求交过程能快速、准确地完成.

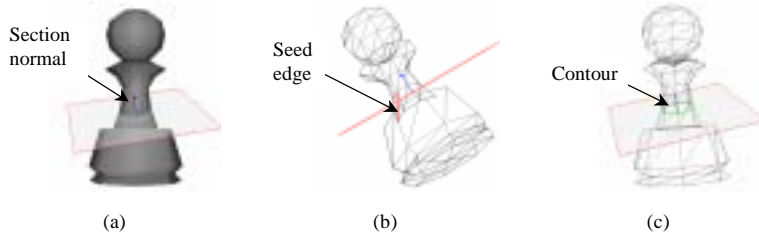


Fig.3 Intersection testing between section and mesh object guided by seed edge

图 3 基于种子边引导的截面与网格物体的求交

3.2 后期修正

与直接连接待融合网格所得到的过渡面与待融合网格的边界相一致不同的是,我们所生成的变分隐式曲面往往会超出待融合网格的边界而与待融合网格相干涉.因此,需要利用生成待融合边界的截面切除过渡多边形网格中多余的部分.与截面与原始待融合网格相交形成原始轮廓类似,截面与过渡三角形网格之间也会相交形成一个或多个多边形(我们将每个这样的多边形称为过渡轮廓).过渡轮廓与原始轮廓一一对应,且形状相似,但一般而言,由于在利用隐式曲面多边形化程序生成过渡三角形网格时并不能总是保证所生成的网格正好经过原始轮廓的顶点,即过渡轮廓与原始轮廓不会自然吻合(如图 4 所示),因此需要在边界处将过渡物体和原始物体进行拓扑合并,使其边界能无缝融合(如图 5 所示).

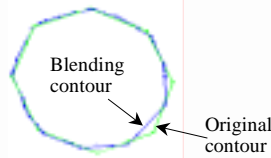


Fig.4 Example of original contour and blending contour

图 4 原始轮廓与过渡轮廓示例

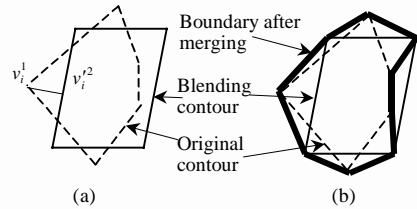


Fig.5 Topology merging of boundary

图 5 边界拓扑合并

具体地,边界拓扑合并分为如下两步:

(1) 通过长度归一化对原始轮廓与过渡轮廓的顶点分别进行参数化.

记原始轮廓顶点集为 $V^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_n^1\}$; 过渡轮廓顶点集为 $V^2 = \{v_1^2, v_2^2, \dots, v_m^2\}$. 首先,分别计算原始轮廓和过渡轮廓的周长 P_1, P_2 . 接着,任取集合 V^1 中的一点 v_i^1 , 求出过渡轮廓上距离 v_i^1 最近的边, 将 v_i^1 投影到该边上, 投影点记为 v_i^2 (如图 5(a)所示); 并记 v_i^1 和 v_i^2 的参数都为 0. 于是,将原始轮廓上每一顶点的参数值设置为其沿着原始轮廓边逆时针到达 v_i^1 所经过的路程与 P_1 之比. 类似地,将过渡轮廓上每一顶点的参数值设置为该顶点沿着过渡轮廓边逆时针到达 v_i^2 的路程与 P_2 之比.

(2) 重采样边界上两个相邻顶点所在的三角形,合并拓扑.具体由以下 3 步完成:

A. 检查原始轮廓上顶点 v_i^1 和 v_{i+1}^1 , 设其参数分别为 t^1 和 t^2 , 不失一般性,假设 $t^1 < t^2$, 考察过渡轮廓上其参数位于区间 (t^1, t^2) 内的顶点集合 $T = \{v_j^2, v_{j+1}^2, \dots, v_{j+k}^2\}$.

B. 若集合 T 非空,将 v_i^1 和 v_{i+1}^1 所在的三角形根据集合 T 内顶点的位置进行重采样(如图 6 所示),反之,继续下一步.

C. 对于原始轮廓下一对待处理的顶点,重复步骤 A 和 B,直至处理完原始轮廓的所有顶点为止. 对于过渡轮廓可类似处理.

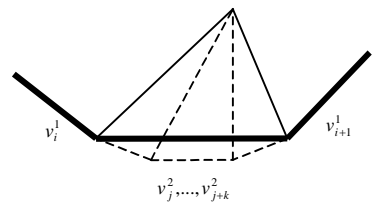


Fig.6 Resampling of triangle

图 6 三角形重采样

4 实验结果

上述算法已经采用 Microsoft Visual C++和 OpenGL 在 PC 平台予以实现.所采用的 CPU 为 Intel P4 1.6GHz, 操作系统为 Windows2000.图 7 和图 8 为算法生成的两个实例.如图 7 所示的是人手模型和异形(alien)模型的双腿之间的光滑融合.如图 8 所示的是人体模型与两个异型的头部之间的光滑融合.从这些例子不难看出,上述算法不仅可以在具有不同拓扑的网格物体间进行光滑融合,而且可以同时针对多个网格物体进行光滑融合.

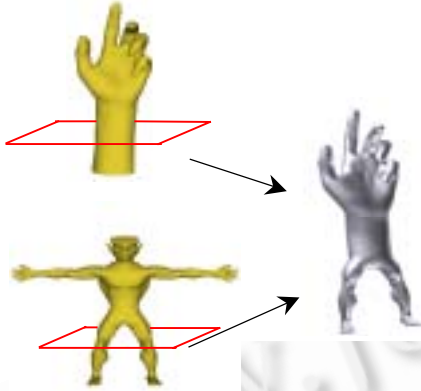


Fig.7 Fusion among a human hand and two legs of an alien

图 7 人手与异形的双腿之间的融合

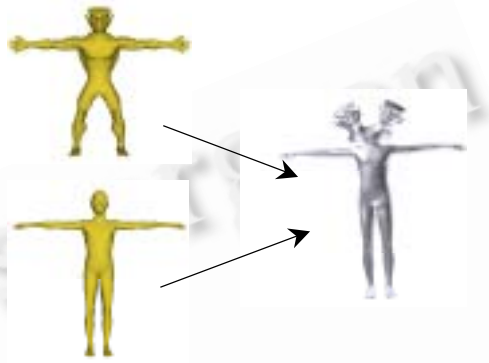


Fig.8 Fusion among a human body and two heads of an alien

图 8 人体与两个异形的头部之间的融合

表 1 列出了有关上述两个实例的统计数据.从表中可以看出,即使对于复杂的多边形网格,算法也仅只需 1 秒左右即可完成过渡曲面的构造及模型的后期修正.

Table 1 Statistics of testing cases

表 1 测试实例统计数据

	Number of objects to be fused	Triangle number before fusion*	Triangle number after fusion	Time cost for constructing blending surface (s)	Time cost for post processing (s)
Fig.7	2	14 719	16542	0.625	0.407
Fig.8	3	7 295	9020	0.281	0.235

* The triangle number before fusion is the sum of the triangle numbers of all participated objects.

5 结论

多边形网格物体融合技术正越来越受到几何造型、计算机动画等领域的研究者和应用者的关注.针对现有主流算法难以融合不同拓扑的网格物体,且不能快速对大规模、稠密的多边形网格进行融合的主要缺陷,我们提出了一种基于变分曲面的网格融合算法.该方法有别于以往直接连接待融合物体边界的做法,通过构造过渡物体并进行后期修正来间接进行多边形网格融合.方法计算快速,使用方便,突破了当前主流算法中对待融合物体的拓扑限制,并允许多个物体同时进行融合.

References:

- [1] Ranta M, Inui M, Kimura F, Mantyla M. Cut and paste based modeling with boundary features. In: Rossignac J, Turner J, Allen G, eds. Proc. of the 2nd Symp. on Solid Modeling and Applications. New York: ACM Press, 1993. 303-312.
- [2] Shah JJ, Mantyla M. Parametric and Feature-Based CAD/CAM. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [3] Pedersen HK. Decorating implicit surfaces. Computer Graphics, 1995,29(3):291-300.
- [4] Bao HJ, Jin XG, Peng QS. Fundamental Algorithms for Computer Animation. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000. 356-368 (in Chinese).

- [5] Bloomenthal J, Bajaj C, Blinn J, Cani-Gascuel M, Rockwood A, Wyvill B, Wyvill G. An Introduction to Implicit Surfaces. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1997.
- [6] Jin XG, Li YF, Peng QS. General constrained deformations based on generalized meatballs. *Computers & Graphics*, 2000,24(2): 219-231.
- [7] Cani-Gascuel MP, Desbrun M. Animation of deformable models using implicit surfaces. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1997,3(1):39-50.
- [8] Jin XG, Tai CL. Analytical methods for polynomial weighted convolution surfaces with various kernels. *Computers & Graphics*, 2002,26(3):437-447.
- [9] Jin XG, Tai CL. Convolution surfaces for arcs and quadratic curves with a varying kernel. *The Visual Computer*, 2002,18(8): 530-546.
- [10] Turk G, O'Brien JF. Shape transformation using variational implicit functions. *Computer Graphics*, 1999,33(Annual Conference Series):335-342.
- [11] Chan LKY, Mann S, Bartels R. World space surface pasting. In: Wayne D, Marilyn M, Victor K, eds. *Proc. of the Conf. on Graphics Interface'97*. Toronto: Canadian Information Processing Society, 1997. 146-154.
- [12] Singh K, Parent R. Joining polyhedral objects using implicitly defined surfaces. *The Visual Computer*, 2001,17(7):415-428.
- [13] Museth K, Breen DE, Whitaker RT, Barr AH. Level set surface editing operators. *ACM Trans. on Graphics*, 2002,21(3):312-332.
- [14] Biermann H, Martin I, Bernardini F, Zorin D. Cut-and-Paste editing of multiresolution surfaces. *ACM Trans. on Graphics*, 2002, 21(3):330-338.
- [15] Kanai T, Suzuki H, Mitani J, Kimura F. Interactive mesh fusion on local 3D metamorphosis. In: Mackenzie S, Stewart J, eds. *Proc. of the 1999 Conf. on Graphics Interface'99*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999. 148-156.
- [16] Kanai T, Suzuki H, Kimura F. Three-dimensional geometric metamorphosis based on harmonic maps. *The Visual Computer*, 1998, 14(4):166-176.
- [17] Kanai T, Suzuki H, Kimura F. Metamorphosis of arbitrary triangular meshes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2000, 20(2):62-75.
- [18] Eck M, DeRose T, Duchamp T, Hoppe H, Lounsbery M, Stuetzle W. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In: Cook R, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'95*. New York: ACM Press, 1995. 173-182.
- [19] Lee AWF, Sweldens W, Schröder P, Cowsar L, Dobkin D. MAPS: Multi-Resolution adaptive parameterization of surfaces. In: *Proc. of the SIGGRAPH'98*. Orlando: ACM Press, 1998. 95-104.
- [20] Liu G, Jin XG, Feng JQ, Peng QS. Montage mesh fusion. *Journal of Software*, 2003,14(8):1425-1432 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1425.htm>
- [21] Terzopoulos. D. The computation of visible-surface representations. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988,10(4):417-438.
- [22] Szeliski R. Fast surface interpolation using hierarchical basis functions. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990,12(6):513-528.
- [23] Celniker G, Gossard D. Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design. *Computer Graphics*, 1991,25(4):257-266.
- [24] Welch W, Witkin A. Free-Form shape design using triangulated surfaces. In: Glassner A, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'94*. New York: ACM Press, 1994. 247-256.
- [25] Bloomenthal J. Polygonization of implicit surfaces. *Computer Aided Geometry Design*, 1988,5(4):341-355.

附中文参考文献:

- [4] 鲍虎军,金小刚,彭群生.计算机动画的算法基础.杭州:浙江大学出版社,2000.356-368.
- [20] 刘刚,金小刚,冯结青,彭群生.蒙太奇网格融合.软件学报,2003,14(8):1425-1432. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1425.htm>