

## 基于断裂面匹配的破碎物体拼接技术

周术诚

(福建农林大学计算机与信息学院 福州 350002)

**摘要:** 该文研究了曲面三角网格模型顶点法矢、主曲率和主方向的计算方法,分析了曲面上点的类型,提出了一种基于断裂面匹配的破碎物体拼接方法。分别用曲面上点的有向脚标和无向脚标构成有向特征向量和无向特征向量,在无向特征向量匹配的基础上,经过匹配点方向映射方法判断其它无向特征匹配点对的有向特征向量的相似性,完成断裂面匹配计算。在断裂面匹配的基础上,通过匹配点方向映射实现破碎物体的拼接。实验结果表明该算法可靠地实现了破碎物体的拼接。

**关键词:** 断裂面; 曲面匹配; 物体拼接; 有向特征; 无向特征

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2470-06

## Technique of Mosaicing Broken Objects Based on Fractured Face Matching

Zhou Shu-cheng

(College of Computer and Information, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Calculating methods of normal vector, principal curvatures and principal directions at each triangular mesh vertexes are researched. Types of vertexes on surface are analyzed. A method for mosaicing broken objects based on fractured faces matching is presented. Directed feature vectors and undirected feature vectors used in surface matching are consisted of directed footprints and undirected footprints respectively. Directed features similarity of pair of matching points is measured through mapping direction of matching points based on undirected features matching. Calculating for matching fractured face is completed. Based on fractured face matching, broken objects mosaicing are realized through mapping direction of pairs of matching points. Experimental results show that presented algorithm can mosaic broken objects reliably.

**Key words:** Fractured face; Surface matching; Objects mosaicing; Directed feature; Undirected feature

### 1 引言

在物体拼接中,对于薄壁的物体可以看成是没有厚度的一张曲面,应用轮廓曲线的匹配关系<sup>[1-4]</sup>就能够实现破碎物体的拼接。在很多情况下,破碎物体的断裂面具有一定的厚度,破碎物体的拼接要用断裂面匹配技术实现。

经过多年的研究,已经研究出许多形状匹配算法。Barequet<sup>[5]</sup>使用有向脚标进行部分曲面匹配;徐金亭等人<sup>[6]</sup>根据曲率特征实现自由曲面的匹配;王坚等人<sup>[7]</sup>采用遗传算法实现曲面匹配;Funkhouser等人<sup>[8]</sup>使用球面调和函数表示形状的形状匹配算法;Osada等人<sup>[9]</sup>应用形状分布方法解决3维模型的匹配问题;Zhang等人<sup>[10]</sup>应用调和映射的方法匹配3维曲面。

目前的匹配算法主要针对物体表面的匹配问题,并且3维物体的拼接多数采用基于轮廓曲线的匹配算法,不能直接应用于带有厚度的碎片拼接,断裂面匹配的破碎物体的拼接的研究较少。

Papaioannou等人<sup>[11]</sup>提出了一种利用深度缓存的方法实现了带有厚度的破碎物体拼接,但该方法人工干预较多。本文将基于脚标的曲面匹配技术应用于破碎物体的拼接中,提出一种基于断裂面匹配的破碎物体拼接技术。

### 2 特征向量的选择和计算

在曲面匹配过程中,特征向量应由反映曲面局部属性的特征不变量构成。在破碎物体复原中,物体表面离散点集经过三角剖分后得到三角网格,因此,可以选择三角网格顶点的特征不变量构成特征向量。

#### 2.1 顶点法矢的计算

三角网格模型可以用顶点集合 $V$ 和三角面片集合 $T$ 表示。三角面片各量的关系如图1所示,三角面片 $T_k$ 的法矢为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} N_{T_k} &= \mathbf{e}_{i,j+1} \times \mathbf{e}_{i,j} / \|\mathbf{e}_{i,j+1} \times \mathbf{e}_{i,j}\| \\ &= \frac{(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{j+1}) \times (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j)}{\|(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{j+1}) \times (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j)\|} \end{aligned} \quad (1)$$

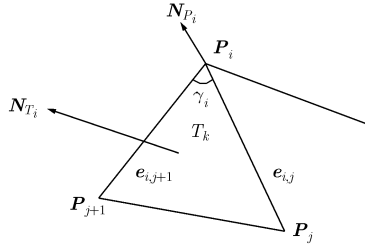


图 1 三角面片各量的关系

其中  $e_{i,j+1}$ ,  $e_{i,j}$  分别表示由顶点  $P_{j+1}$  指向顶点  $P_i$  的边矢量和由顶点  $P_j$  指向顶点  $P_i$  的边矢量。

顶点  $P_i$  的法矢可用其邻域三角面片法矢进行面积加权平均计算

$$N_{P_i} = \sum_{T_i \in \mathcal{T}^i} \gamma_i A_{T_i} N_{T_i} / \left\| \sum_{T_i \in \mathcal{T}^i} \gamma_i A_{T_i} N_{T_i} \right\| \quad (2)$$

其中  $\gamma_i$  为三角面片在顶点  $P_i$  处的内角,  $A_{T_i}$  为三角面片  $T_i$  的面积,  $\mathcal{T}^i$  为包含顶点  $P_i$  的三角面片集合。

### 2.2 主曲率和主方向的计算

计算出点  $P_i$  的法矢  $N_{P_i}$  后, 作  $P_i$  处的切平面, 其邻接点  $P_j$  在此切平面上的投影为  $P_j^\perp$ , 则  $P_i$  点在其切平面上沿  $P_i P_j^\perp$  方向的单位切矢  $T_{ij}$  为

$$T_{ij} = \frac{\langle N_{P_i}, P_j - P_i \rangle N_{P_i} - (P_j - P_i)}{\left\| \langle N_{P_i}, P_j - P_i \rangle N_{P_i} - (P_j - P_i) \right\|} \quad (3)$$

其中  $\langle \cdot \rangle$  表示两个向量的内积。沿切矢  $T_{ij}$  方向的曲率为

$$k_{ij} = 2 \langle N_{P_i}, P_j - P_i \rangle / \left\| P_j - P_i \right\|^2 \quad (4)$$

Taubin<sup>[13]</sup>通过构造对称矩阵以及相应的近似矩阵计算  $P_i$  点的主曲率  $k_{P_i}^1$ ,  $k_{P_i}^2$  和主方向  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ 。

设  $T_{i1}$  和  $T_{i2}$  是  $P_i$  处的两个主方向, 对于  $P_i$  点, 根据 Euler 公式, 该点在  $T_\varphi$  方向的方向曲率为

$$k_{P_i}(T_\varphi) = k_{P_i}^1 \cos^2 \varphi + k_{P_i}^2 \sin^2 \varphi \quad (5)$$

将式(5)在区间  $[-\pi, \pi]$  积分得到对称矩阵

$$M_{P_i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} k_{P_i}(T_\varphi) T_\varphi T_\varphi^T d\varphi \quad (6)$$

其中  $T_\varphi^T$  表示  $T_\varphi$  的转置, 将对称矩阵  $M_{P_i}$  按下式分解

$$M_{P_i} = T_i^T \begin{bmatrix} m_{P_i}^{11} & m_{P_i}^{12} \\ m_{P_i}^{21} & m_{P_i}^{22} \end{bmatrix} T_i \quad (7)$$

其中  $T_i = [T_{i1}, T_{i2}]$  是一个  $3 \times 2$  矩阵。从式(6), 式(7)可以求出主曲率为

$$\left. \begin{aligned} k_{P_i}^1 &= 3m_{P_i}^{11} - m_{P_i}^{22} \\ k_{P_i}^2 &= 3m_{P_i}^{22} - m_{P_i}^{11} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

矩阵  $M_{P_i}$  可以用下列矩阵  $\widetilde{M}_{P_i}$  近似

$$\widetilde{M}_{P_i} = \sum_{P_j \in \mathcal{V}^i} w_{ij} k_{ij} T_{ij} T_{ij}^T \quad (9)$$

其中  $w_{ij} = A_{T_i} / \sum_{T_k \in \mathcal{T}^i} A_{T_k}$ , 且  $\sum w_{ij} = 1$ 。

设  $E = (1, 0, 0)^T$ , 令

$$W_{P_i} = \frac{E \pm N_{P_i}}{\left\| E \pm N_{P_i} \right\|} \quad (10)$$

其中当  $\left\| E - N_{P_i} \right\| > \left\| E + N_{P_i} \right\|$  时取负号, 否则取正号。Householder 矩阵为

$$Q_{P_i} = I - 2W_{P_i} W_{P_i}^T$$

在切平面上定义两个正交基向量  $\widetilde{T}_{i1}$ ,  $\widetilde{T}_{i2}$ , 由于  $N_{P_i}$  是  $\widetilde{M}_{P_i}$  特征值为 0 的特征向量, 可得

$$Q_{P_i}^T \widetilde{M}_{P_i} Q_{P_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \widetilde{m}_{P_i}^{11} & \widetilde{m}_{P_i}^{12} \\ 0 & \widetilde{m}_{P_i}^{21} & \widetilde{m}_{P_i}^{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中,  $\widetilde{m}_{P_i}^{12} = \widetilde{m}_{P_i}^{21}$ , 对式(11)的非零部分进行 Givens 旋转, 旋转的角度为  $\varphi$ , 使之成为对角矩阵, 从而可以计算出角度  $\varphi$ , 则主方向  $T_{i1}$  和  $T_{i2}$  为

$$\left. \begin{aligned} T_{i1} &= \widetilde{T}_{i1} \cos \varphi - \widetilde{T}_{i2} \sin \varphi \\ T_{i2} &= \widetilde{T}_{i2} \sin \varphi + \widetilde{T}_{i1} \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

通过以上计算, 可以算出三角网格模型上一点的主曲率和主方向, 根据高斯曲率、平均曲率与主曲率的关系, 则点  $P_i$  处的高斯曲率  $k_{P_i}^G$  和平均曲率  $k_{P_i}^H$  分别为

$$k_{P_i}^G = k_{P_i}^1 \cdot k_{P_i}^2, \quad k_{P_i}^H = \frac{1}{2}(k_{P_i}^1 + k_{P_i}^2) \quad (13)$$

根据高斯曲率、平均曲率与主曲率的关系, 则点  $P_i$  处的高斯曲率  $k_{P_i}^G$  和平均曲率  $k_{P_i}^H$  分别为

$$k_{P_i}^G = k_{P_i}^1 \cdot k_{P_i}^2, \quad k_{P_i}^H = \frac{1}{2}(k_{P_i}^1 + k_{P_i}^2) \quad (14)$$

### 2.3 确定点的类型

计算出曲面上点的特征后, 为了提高速度, 应对曲面的点进行类型划分。当法矢改变方向时, 主曲率  $k_{P_i}^1$  和  $k_{P_i}^2$  同时改变符号, 而高斯曲率不会受到影响, 因此, 高斯曲率只与曲面的内在性质有关, 通过高斯曲率的正、负可以将点划分为 4 种类型。

$k_{P_i}^1$  和  $k_{P_i}^2$  符号相同时,  $k_{P_i}^G > 0$ , 则该点为椭圆点;  $k_{P_i}^1$  和  $k_{P_i}^2$  符号不同时,  $k_{P_i}^G < 0$ , 则该点为双曲点;  $k_{P_i}^1$  和  $k_{P_i}^2$  中有一个值为 0 时,  $k_{P_i}^G = 0$ , 该点为抛物点; 如果  $k_{P_i}^1 = 0$  且  $k_{P_i}^2 = 0$  时, 该点为平点。对点进行分类时设置一个容许误差值  $\delta$  以消除计算误差, 只要高斯曲率的绝对值小等于  $\delta$ , 即  $|k_{P_i}^G| \leq \delta$ , 就认为该点的高斯曲率为 0, 该点为抛物点或平点(平均曲率小于或等于  $\delta$ ); 如果高斯曲率大于  $\delta$ , 即  $k_{P_i}^G > \delta$  则认为该点为椭圆点, 否则  $k_{P_i}^G < -\delta$ , 该点

为双曲点。在本文中,将平点当作抛物点的特例归在同一类中进行处理。

在具体实现匹配计算时,对点  $P_i$  的类型用一个类型变量  $M_{P_i}$  表示,分别用数字 1, 2, 3 表示抛物点(或平点)、椭圆点和双曲点。

#### 2.4 特征向量的构成

由 Euler 定理可知,曲面上一点的曲率可由主曲率和方向角唯一地确定,并且高斯曲率只与曲面的内在性质有关,根据高斯曲率的符号可以判断出点的类型,高斯曲率和平均曲率可由主曲率计算得到。如果直接以曲率值的大小进行初始匹配点的比较计算,可能会找到许多曲率值相近而方向不匹配的匹配点对。实际的匹配点应该是曲率和方向都匹配,匹配点属于同一类型。因此,对于两张表面上的对应点,在进行相似性判断时,不仅要考虑其曲率的大小,还要考虑其方向。同时,为了提高算法的效率,先要对点的类型进行划分,抛物点形成的曲率线将双曲面区域和凸或凹的区域分开,一张曲面被划分成多个区域,匹配点对只在两个相同形状之间进行选取,然后在相同类型的点中进行曲率和方向的匹配计算。

根据以上分析,曲面上一点的特征向量就由法矢、主方向、高斯曲率、平均曲率和曲面上点的类型  $M_{P_i}$  构成。为了满足匹配计算中相似性度量的要求,本文将一点的特征用两个特征向量表示,一个表示了点的方向信息,是有向脚标,构成曲面上一点的有向特征向量  $\xi_{P_i,D}$ ,另一个特征向量表示了当前点的曲率和类型,是无向脚标,构成该点的无向特征向量  $\xi_{P_i,U}$ 。无向特征向量是标量,具有旋转、缩放和平移不变性,方向特征向量反映了曲面上一点的方向信息。因此,应用脚标构成曲面的特征向量,能够较好地判断曲面的相似性。 $P_i$  的特征向量可表示如下

$$\left. \begin{aligned} \xi_{P_i,D} &= [N_{P_i} \quad T_{i1} \quad T_{i2}] \\ \xi_{P_i,U} &= [M_{P_i} \quad k_{P_i}^G \quad k_{P_i}^H] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式(15)所定义的特征向量不仅反映了曲面上一点的性质,同时反映了该点的方向,较好地反映了曲面的局部特征。无向特征向量是标量,具有旋转、缩放和平移不变性,方向特征向量反映了曲面上一点的方向信息。

### 3 相似性度量

由于要实现带有厚度的物体拼接,拼接部分是破碎物体的断裂面,因此,需要进行物体表面的分割处理,使得物体可以看成是由一些具有相似方向的简洁的曲面构成。Papaioannou 等人<sup>[14]</sup>提出了一

种区域增长算法实现曲面的分割。曲面分割结束后,考虑到物体破碎后的缺损及数据采集误差,要删除一些没有实际意义区域。如果一个区域面积小于其邻接较大曲面面积的 2%~5%时,则将其删除。另外为了消除噪声和物体缺损的影响,降低计算量,提高速度,需要对曲面作光顺处理。

假设要进行匹配和拼接处理的物体经过 3 维扫描仪扫描得到曲面的点云数据,经过相同的剖分准则进行三角剖分后得到三角网格模型,对网格进行必要的简化处理。在得到三角网格后,计算待匹配曲面上各点的法矢、主方向、曲率和类型等特征量,对每张曲面构造一个特征向量表用于存放曲面上点的特征向量。

设  $P_i$  为曲面  $S_1$  上的一点,  $Q_j$  为曲面  $S_2$  上的一点,点  $P_i$  的有向特征向量和无向特征向量分别表示为  $\xi_{P_i,D} = [N_{P_i} \quad T_{P_{i1}} \quad T_{P_{i2}}]$  和  $\xi_{P_i,U} = [M_{P_i} \quad k_{P_i}^G \quad k_{P_i}^H]$ ,  $Q_j$  点的有向特征向量和无向特征向量分别表示为  $\xi_{Q_j,D} = [N_{Q_j} \quad T_{Q_{j1}} \quad T_{Q_{j2}}]$  和  $\xi_{Q_j,U} = [M_{Q_j} \quad k_{Q_j}^G \quad k_{Q_j}^H]$ 。为了判断两点之间的相似度,分别计算每对点的有向特征和无向特征之间的距离。由于两块碎片拼接时,其断裂面是相对的,因此,匹配点对的法矢方向相反,主方向相同,高斯曲率和平均曲率相同,即两个匹配点的方向特征向量之间相差的角度为  $\pi$ ,无向特征相等。两特征向量之间的距离为

$$\left. \begin{aligned} D(P_i, Q_j)_U &= \|\xi_{P_i,U} - \xi_{Q_j,U}\| \\ D(P_i, Q_j)_D &= \left| \pi - \|\xi_{P_i,D} - \xi_{Q_j,D}\| \right| \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)中  $\|\cdot\|$  是某种距离范数,本文采用欧氏距离。

通过两特征向量的距离计算,同时考虑噪声和误差的影响,分别设置两个误差容许值,如果两张断裂面上对应点  $P_i$  和  $Q_j$  的特征向量的距离在误差允许范围内,即无向特征相等或相近,而它们的有向特征向量在平移和旋转后,法矢方向相反,而主方向一致或相近,那么两块碎片的断裂面匹配,碎片能够拼接。

## 4 匹配和拼接算法

### 4.1 方向映射

在匹配计算时,匹配点的方向映射是算法的一个关键步骤,文献[5]给出了球体映射实现两点方向一致的方法。本文根据曲面匹配进行断裂面拼接的要求,需要实现匹配点对的法矢方向相反。

匹配点方向映射方法如图 2 所示。在图 2 中,  $n_1$  和  $n_2$  分别为匹配点对  $P_1$  和  $Q_1$  的单位法矢,  $R_\omega^L$  表示在 3 维空间中绕轴  $L$  转过一个角度  $\omega$ 。旋转轴要求规范化,即其模为 1 并且  $Z$  分量非负。首先,计算

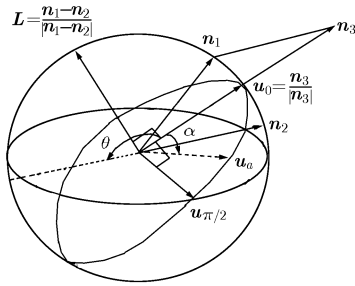


图 2 匹配点方向映射图

将  $n_1$  映射到  $n_2$  的旋转矩阵。如果是要求两个有向脚标一致, 任意一个与  $n_1$  和  $n_2$  夹角相等的向量都可以作为旋转轴。但基于曲面匹配的物体拼接中, 匹配点的法矢应相反, 因此, 要选择一个特定的旋转轴, 计算将  $n_1$  映射到  $n_2$  的旋转矩阵, 使匹配点的法矢相反。

以  $n_3 = n_1 + n_2$  的单位向量  $u_0$  为  $n_1$  所围绕的初始轴,  $u_\alpha = R_\alpha^L(u_0)$  是  $u_0$  绕着  $n_1 - n_2$  的单位向量  $L$  旋转  $\alpha$  角后得到的向量, 其中  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ 。由于  $n_1$  应绕着与之垂直的轴旋转才能使  $n_1$  与  $n_2$  的方向相反, 因此应使  $\alpha = \pi/2$  或  $\alpha = -\pi/2$ , 即两个被围绕的轴分别为  $u_{\pi/2}$ ,  $u_{-\pi/2}$ ,  $n_1$  经过旋转  $\theta = \pi - \angle n_1 n_2$  后,  $n_1$  与  $n_2$  方向相反, 即  $n_2 = R_\theta^{u_{\pm\pi/2}}(n_1)$ ; 法矢旋转后, 经过平移两个匹配点重合。经过类似的处理方法, 可以实现匹配点处的主方向一致。

在实际处理过程中, 当两个法矢  $n_1$  和  $n_2$  的方向相同时, 直接用  $-n_2$  即可得到  $n_1$  的反向矢量, 相当于旋转的角度为  $\pi$ ; 当两个法矢  $n_1$  和  $n_2$  方向相反时, 不需要旋转。

在得到旋转矩阵  $R_\theta^{u_{\pi/2}}$  后, 可以通过相应的平移使得匹配点重合。平移矩阵  $t = Q_1 - R_\theta^{u_{\pi/2}}(P_1)$ , 则将旋转加平移  $t$  后的矩阵记为  $T_{\theta,t}^{u_{\pi/2}}$ 。

#### 4.2 匹配和拼接算法描述

在匹配过程中, 如果对所有的点采用相同的处理方法, 计算量非常大, 会影响匹配的速度, 物体在摔碎时会有缺损或数据采集时噪声引起的误差, 造成相邻断裂面不完全一致。因此, 先根据曲面的性质对曲面进行形状分类。根据曲面上点的特征计算后, 考虑到数据采集引入的噪声、缺损及计算上的误差, 在具体分类时, 设定一个误差值  $\delta$ , 只要高斯曲率的绝对值小等于  $\delta$ , 即  $|k_p^G| \leq \delta$ , 就认为该点的高斯曲率为 0, 该点为抛物点或平点(平均曲率小于或等于  $\delta$ ); 如果高斯曲率大于  $\delta$ , 即  $k_p^G > \delta$  则认为是椭圆点, 否则  $k_p^G < -\delta$ , 该点为双曲点。在本文中, 将平点当作抛物点的特例归在同一类中进行处理。

根据点的类型可知, 如果曲面上存在抛物点, 则抛物点形成的曲率线将双曲面区域和凸或凹的区域分开, 因此, 一张曲面被划分成多个区域。经过类型划分后, 匹配点对只在两个相同形状之间进行选取。

本文提出的匹配计算分为粗匹配过程和细匹配过程两个步骤, 在两个匹配计算时, 考虑到数据采集、物体缺损和计算误差的影响, 分别设置两个误差容许值  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ 。粗匹配就是先按照某种相似性度量准则判断两点的无向特征向量, 如果两点的无向特征向量的距离小于或等于  $\varepsilon_1$ , 则认为两点的无向特征向量一致或相近, 两点才有可能为匹配点对, 否则两点不匹配; 细匹配是在粗匹配的基础上, 当两点的无向特征向量一致或相近时, 通过匹配点方向映射经旋转和平移等操作后, 判断两张曲面上各个对应点的有向特征向量的相似性, 如果两点的有向特征向量的距离小于或等于  $\varepsilon_2$ , 则两点的有向特征一致或相近。如果曲面或曲面的一个区域内所有点的有向特征和无向特征都匹配, 则两张曲面全部或部分匹配; 如果两块碎片曲面全部或部分匹配则两块碎片存在拼接的可能性。判断曲面上各点的有向特征是否匹配, 可以在找到一个匹配点后, 经平移和旋转后使匹配点的法向量相反, 而主方向一致, 然后再根据两张曲面上各点的有向特征和无向特征计算匹配点邻域其它点的匹配关系。

根据以上分析, 匹配算法描述如下:

步骤1 计算曲面  $S_1$  和  $S_2$  上各点的特征值及类型, 并用有向脚标和无向脚标分别构成相应的有向特征向量和无向特征向量, 并根据高斯曲率将各点的邻域信息和特征向量保存在各自对应的类型数组中, 并对每点的属性设置相应的类型标志;

步骤2 计算两张曲面对应类型中各点的无向特征向量的相似性, 如果两点的无向特征向量的距离小于或等于误差允许值  $\varepsilon_1$ , 则认为两点的无向特征匹配, 形成一匹配点对放入对应类型的匹配点对数组中;

步骤3 如果没有处理完所有的点, 则转步骤 2;

步骤4 从匹配点对数组中取出一对匹配点, 以该点对为当前点对;

步骤5 应用球体映射方法通过旋转和平移操作, 使当前匹配点对的法向量相反, 主方向一致, 根据旋转和平移矩阵, 处理其曲面上其它点的方向特征向量, 使其为相对于新坐标下的有向特征向量。先计算邻接点的无向特征的相似性, 如果相似, 然后计算匹配点对的所有邻接点的特征向量间的距

离, 如果两点之间的有向距离小于或等于  $\varepsilon_2$ , 则两点匹配, 否则, 两点不匹配; 取一个匹配的邻接点为当前点, 迭代执行匹配计算操作, 直到无匹配点;

步骤6 如果没有处理完所有匹配点对数组中的匹配点对, 转步骤4;

步骤7 匹配计算结束。

在进行相似性计算时, 容许误差  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  要根据具体的碎片是否缺损等因素进行选择, 否则会影响匹配计算的结果。为了消除噪声、提高匹配计算的速度, 通过区域增长算法删除一些没有实际意义的小区域, 并用点对压缩算法对原始的三角网格进行简化处理, 删除或合并一些顶点, 达到平滑滤波的目的, 减少匹配过程处理的顶点数。如果在两张曲面上没有找到匹配的点对, 则两张曲面不匹配, 必须重新选择曲面进行匹配计算; 如果处理完所有的碎片曲面都没有找到匹配的曲面, 则两块碎片不能拼接。

根据以上算法, 可以判断两张曲面是全部匹配, 还是部分匹配或不匹配。如果对两个物体所有的面采用相同的方法处理, 则能判断出两块碎片是否相邻, 能否拼接; 碎片数量较多时, 可能会找到几块匹配区域, 这时可根据对各个匹配区域的试拼接的方法判断两块碎片的相邻情况, 以决定是否可为拼接的断裂面, 如果是相邻碎片的断裂面, 则可以拼接, 这些处理过程要借助人工辅助方法实现。

## 5 实验结果和分析

实验模型分别被任意不规则曲面切割, 并且在断裂面上删除了一些顶点和面片, 以模拟物体被摔碎形成的断裂面。图3和图4分别是两个长方体采用不同的任意复杂曲面切割后的三维模型匹配和拼接图。图3(a)和图4(a)是部分物体模型和三角网格, 其中, 左边是原始断裂面, 中间是经过平滑后的断裂面, 右边是三角网格; 图3(b)和图4(b)分别是图3(a)和图4(a)匹配后拼接的模型及三角网格。

从实验结果可见, 该算法能在不同的曲面集中找到相邻曲面, 处理不同的复杂曲面和具有小块缺损的曲面情况, 且能够达到比较好的拼接结果, 说明了算法的有效性, 且具有一定的鲁棒性。由于采用的是人工的模型数据, 并且经过平滑处理, 匹配速度较快。由于数据的离散处理及计算的误差, 拼接后有一些偏移, 这些偏移可以在拼接后, 通过人工辅助的方法进行微调(旋转和平移)以达到更好的结果。物体在自然破碎时, 其断裂面复杂, 并且有可能缺损较大, 采集的数据点数较多, 匹配的速度和自动化程度将会下降, 需要较多的人工辅助处理

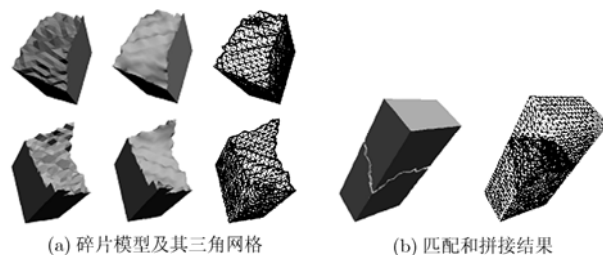


图3 匹配和拼接模型1

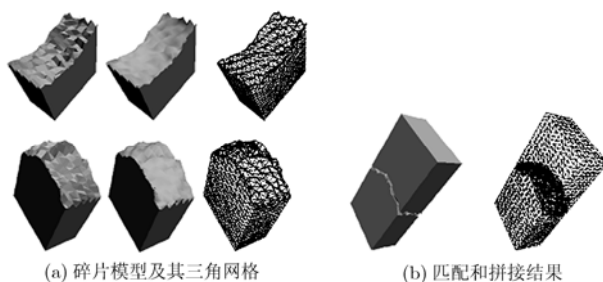


图4 匹配和拼接模型2

拼接的结果。

通过对算法的分析和实验情况可以看出, 虽然本算法在实现过程中需要一定的人工辅助, 但文献[11]所提的算法, 在实现匹配和拼接的3个阶段中, 首先需要对分割面进行标记以作为候选的匹配面, 然后在匹配和拼接过程中需要先通过位置参数调整以定位两张待匹配面的方向使其相向, 再通过旋转和平移实现拼接, 在这些处理过程中人工干预较多, 许多情况下要通过人工判断两张曲面是否匹配, 自动化程度低, 而本文提出的算法对每张曲面计算特征向量后, 自动完成曲面的匹配和拼接计算, 只有在受到计算误差的影响使拼接出现偏移后进行人工辅助调整, 因此, 人工干预的较少, 速度快。

## 6 结论

为了实现带有厚度的破碎物体的拼接, 完成破碎物体的复原, 本文提出了由有向脚标和无向脚标分别构成有向特征向量和无向特征向量实现曲面匹配的拼接方法, 通过两次相似性判断以决定曲面的匹配关系, 找到匹配曲面后, 通过方向映射以实现破碎物体的拼接。根据实验结果可以看出, 所提出的算法能够正确计算匹配的断裂面以实现相邻碎片的拼接, 说明该算法的有效性。但是, 由于物体离散处理及计算上的误差, 拼接时会出现一些偏移, 需要在拼接后通过人工辅助方法对准。在匹配计算时, 可以先指定一个要匹配的断裂面, 然后根据指定曲面寻找与之匹配的相邻碎片断裂面, 这样可以提高匹配和拼接速度。

## 参 考 文 献

- [1] Kampel M and Sablatnig R. On 3D mosaicing of rotationally symmetric ceramic fragments[C]. Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'2004), Cambridge, 2004, 2: 265-268.
- [2] 周术诚, 耿国华, 周明全. 三维破碎物体多尺度拼接技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(10): 1525-1530.  
Zhou Shu-cheng, Geng Guo-hua, and Zhou Ming-quan. A multiscale method for mosaicing 3D fragmented objects[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(10): 1525-1530.
- [3] 张志刚, 周术诚, 马君, 等. 基于曲率特征的轮廓匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(14): 57-58.  
Zhang Zhi-gang, Zhou Shu-sheng, and Ma Jun, et al. Contour matching based on curvature feature[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(14): 57-58.
- [4] 王斌, 舒华忠, 施朝健, 等. 一种基于轮廓线的形状描述和匹配方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 949-952.  
Wang Bin, Shu Hua-zhong, and Shi Chao-jian, et al. A contour-based shape description and matching method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 949-952.
- [5] Barequet G and Sharir M. Partial surface matching by using directed footprints[J]. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 1999, 12(1-2): 45-62.
- [6] 徐金亭, 刘伟军, 孙玉文. 基于曲率特征的自由曲面匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(2): 193-197.  
Xu Jin-ting, Liu Wei-jun, and Sun Yu-wen. Algorithm for free-form surface matching based on curvatures[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(2): 193-197.
- [7] 王坚, 周来水, 张丽艳, 等. 基于遗传算法的曲面匹配[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4): 695-699.  
Wang Jian, Zhou Lai-shui, and Zhang Li-yan, et al. Surface matching based on genetic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(7): 695-699.
- [8] Funkhouser T, Min P, and Kazhdan M, et al. A search engine for 3D models[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(1): 83-105.
- [9] Osada R, Funkhouser T, and Chazelle B, et al. Matching 3D models with shape distributions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4): 807-832.
- [10] Zhang D and Hebert M. Harmonic maps and their applications in surface matching[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, Colorado, 1999, 2: 524-530.
- [11] Papaioannou G, Karabassi E A, and Theoharis T. Virtual archaeologist: Assembling the past[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(2): 53-59.
- [12] 神会存, 周来水, 安鲁陵, 等. 曲面三角网格模型顶点法矢计算与交互式分割[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1030-1033.  
Shen Hui-cun, Zhou Lai-shui, and An Lu-ling, et al. Vertex normal calculation and interactive segmentation of triangle mesh[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(5): 1030-1033.
- [13] Taubin G. Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation[C]. Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision, Boston, 1995: 902-907.
- [14] Papaioannou G, Karabassi E A, and Theoharis T. Segmentation and surface characterization of arbitrary 3D meshes for object reconstruction and recognition[C]. Proceedings of 15th International Conference of Pattern Recognition, Barcelona, Spain, 2000: 734-737.
- 周术诚: 男, 1965年生, 副教授, 博士, 研究方向为图形图像处理、科学计算可视化。