

# 一种基于 DDTW 的三维碎片自动拼接方法

高 剑<sup>1)</sup> 张彩明<sup>1)</sup> 孟祥旭<sup>1)</sup> 冯志全<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(山东大学计算机科学与技术学院 济南 250101)

<sup>2)</sup>(济南大学信息科学与工程学院 济南 250022)

**摘 要** 提出了一种基于导数动态时间规整(DDTW)的三维碎片自动拼接方法,可以计算两块碎片最合理的拼接方式.同时设计了一种基于抗噪区间拟合的挠率估计方法和常数时间复杂度的三维重叠检测方法,大幅度提高了拼接的速度和准确性.首先确定物体碎片的轮廓曲线,查找角点,根据角点将轮廓曲线分段成子轮廓线,计算子轮廓曲线的挠率特征串;然后使用 DDTW 对两个特征串进行匹配,并给出匹配度的度量值,继而根据对应点的空间位置关系对碎片进行放缩和刚体变换,调用三维重叠检测方法排除重叠匹配;最后根据给定的评价标准找到最优匹配作为最终拼接结果.实验表明,该方法实现简单,鲁棒性强,能快速得到三维碎片集合的拼接结果.

**关键词** 三维碎片;拼接;挠率;DDTW;重叠检测

**中图法分类号** TP391 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.00342

## Automatic Fragment Re-Assembly Method Based on DDTW Match

GAO Jian<sup>1)</sup> ZHANG Cai-Ming<sup>1)</sup> MENG Xiang-Xu<sup>1)</sup> FENG Zhi-Quan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101)

<sup>2)</sup>(School of Information and Science Engineering, Jinan University, Jinan 250022)

**Abstract** This paper presents an automatic re-assembly method for matching 3D fragments, which can compute the best match of a pair of broken pieces. To improve speed and accuracy, this paper gives a torsion estimation method based on anti-noise section and a fixed time cost 3D overlap test method. First, the contour curves of fragments are found, then the corner points. Contour curves can be divided into several sub-contours. Second, the torsion sequences are obtained for the DDTW based matching work. Thus, the scale and transformation matrixes can be computed to change size and position of one fragment. Best matching result will be finally chosen according to matching test and extra evaluations. Experiment results show that this method is simple and robust, and can get proper matching results quickly.

**Keywords** 3D fragment; assembly; torsion; DDTW; overlapping detection

## 1 引 言

在考古发掘、现场还原、自动装配等工作中经常需要将来自一个或多个物体的碎片重新整合复原.当物体数量繁多的时候该工作就变得非常繁重,如

果单纯依靠人工完成几乎是不能实现的,所以三维碎片的自动拼接研究有着深远的理论和应用价值.

三维拼接是个古老而又复杂的问题,在学者们多年的潜心研究过程中积累了若干方法,但在很多具体情况下仍然不能很好地解决拼接问题.一般认为物体的自动拼接可以分为两个阶段,首先根据碎

收稿日期:2006-08-08;最终修改稿收到日期:2009-01-06. 本课题得到国家自然科学基金(60673003,60633030)资助. 高 剑,男,1977年生,博士研究生,研究方向为计算机图形学、计算几何、图像处理. E-mail: gj@mail.sdu.edu.cn. 张彩明,男,1955年生,博士,教授,博士生导师,研究领域为计算机辅助几何设计、计算机图形学、科学计算可视化、医学图像处理. 孟祥旭,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,研究领域包括计算机图形学、计算机软件与理论、人机交互与虚拟现实、CIMS/CAD/CAM等. 冯志全,男,博士,教授,研究领域为计算机图形图像处理、虚拟现实、人机交互、运动人手跟踪.

片的纹理、颜色和几何信息进行局部匹配,找出所有可能的、较为合理的拼接方案,然后采用某种全局算法搜索最优拼接.这两个阶段的处理都非常重要,第二个阶段的处理直接以第一个阶段的结果为数据,所以第一个阶段计算的合理性显得更加重要.在实践中发现在很多情况下碎片不能够提供可用的纹理、颜色(如文物表面由于各种原因导致了破损或者原本就没有此类信息),于是当前研究的重点主要集中于基于边缘几何特征的拼接方法.

Martin<sup>[1]</sup>将三维碎片自动拼接研究推进了一步,但是只能拼接旋转对称的器皿,因为根据碎片可以比较容易找到旋转轴,减少一个自由度,其实并没有真正的实现无约束的三维拼接. Ucoluk<sup>[2]</sup>讨论了三维物体自动拼接问题,在局部匹配中采用了穷举方法,时间复杂度很高,并且没有使用实际数据进行测试. Kong<sup>[3]</sup>研究了二维和三维拼图问题,采用动态规划法进行曲线匹配,但没有考虑碎片不完全匹配的情况(在破碎过程中可能会丢失一些小碎片). 潘<sup>[4]</sup>估计碎片边缘曲率,然后比较特征串实现了自动拼接,但没有处理三维的情况. 以上方法均采用了最长公共子序列(LCS)的算法,但是 LCS 算法要求两个比对序列数据的空间密度一致才能正常工作,一旦打破这个条件此类方法就不同程度地受到限制了.

考虑到相邻两块碎片可能会使用不同的分辨率进行扫描,而且同一个碎片各部分与结构光方向所成角度不一致,也会导致数据密度不均匀,相邻两个点之间的距离差异可能会比较大,同时相同长度的一段轮廓线可能会包含数量差别较大的点集. 本文给出了一种基于导数动态时间规整(DDTW)的三维碎片自动拼接方法,可以计算两块碎片最合理的拼接方式. 同时设计了基于抗噪区间拟合的挠率估计方法和线性时间复杂度的三维重叠检测方法,大幅度提高了拼接的速度和准确性. 首先确定物体碎片的轮廓曲线,查找角点,根据角点将轮廓曲线分段成子轮廓线,计算子轮廓曲线的挠率特征串;然后使用 DDTW 对两个特征串进行匹配,并给出匹配度的度量值;继而根据对应点的空间位置关系对碎片进行刚体变换,调用三维重叠检测方法排除重叠匹配;最后根据给定的评价标准找到最优匹配作为最终拼接结果,实现自动拼接.

2 数据准备

三维碎片一般通过三维扫描仪扫描获得其几何

信息,每一个碎片作为一个独立物体,通过对原始数据的修正和去噪处理可以得到碎片较为精确的空间点集表示. 在此基础上通过文献[3]中的动态规划方法可以很快找到碎片外表面断裂轮廓线. 轮廓线上的一些点有着重要的几何意义. 在物体候断裂处一般会呈现两种形式,一种是“Y”型,一种是“T”型(见图 1),裂缝交汇处所在的点我们称为“角点”. 利用文献[5]中的方法可以快速找到角点,根据角点可以将轮廓线分成若干子轮廓线. 该划分有着重要的意义,因为对整条轮廓线进行直接比对会产生巨大的工作量,造成时间上的浪费. 由于碎片最终要在子轮廓线所在边缘处实现拼接,所以分别比对各子轮廓线将会得到合理的拼接结果. 图 2 描述了完整的数据准备处理过程.

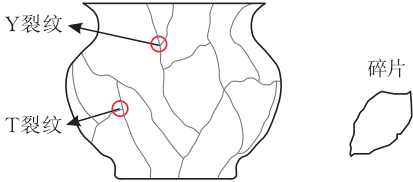


图 1 Y 型裂纹和 T 型裂纹

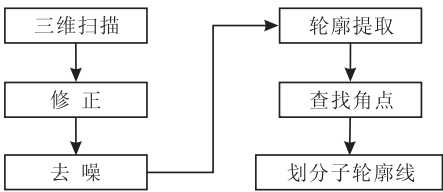


图 2 数据准备过程

3 轮廓曲线几何特征串的获取

基于几何特征的匹配算法最为核心的内容就是找到有效的边缘几何特征串,该特征串应具备这样的性质:(1)具有仿射不变的特点;(2)能够唯一表示某点处的几何特征,不能出现不同的几何特征表示为相同特征值的情况;(3)在计算的过程中应该具备较强的抗噪能力,不能因为噪声的存在对匹配过程造成较大影响. 根据微分几何中的有关定义,挠率可以反映空间曲线在每个点扭曲的情况,一条给定的空间曲线  $r(t)$  会对应一条唯一的挠率曲线  $\tau(t)$ . 通过比较,在若干几何量中,挠率是最为直观和最符合特征串性质的一个.

对于连续空间曲线  $r(t)$ ,挠率有严格的数学公式定义:

$$\tau(t) = \frac{[r'(t) \times r''(t)] \cdot r'''(t)}{(r'(t) \times r''(t))^2} \tag{1}$$

其中,  $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))^T$ ,  $\mathbf{r}'(t) = (x'(t), y'(t), z'(t))^T$ ,  $\mathbf{r}''(t) = (x''(t), y''(t), z''(t))^T$ ,  $\mathbf{r}'''(t) = (x'''(t), y'''(t), z'''(t))^T$ , 要求  $x(t), y(t), z(t)$  是连续函数, 且同时具有三阶的导数. 但是在三维拼接中遇到的都是离散的数字曲线, 对于离散三维扫描数据并不存在“真实挠率曲线”, 因为事先没有任何有数学表达式的曲线存在, 但这些离散点的空间分布也能反映出明显的几何特征, 所以无法直接利用连续型挠率公式进行计算, 必须基于离散几何信息给出挠率的估计方法. 传统的挠率估计, 如 Medina<sup>[6]</sup> 等人使用的傅立叶变换方法一般不能很好地抵抗噪声干扰, 这会给匹配特征串的工作造成很大困难, 经常不能得到合理的匹配结果, 所以不能直接应用. 我们给出了一种基于抗噪区间拟合的离散挠率估计方法, 该方法可以有效地消除噪声, 并保留足够的空间特征信息在计算结果中.

### 3.1 轮廓曲线挠率的近似估计

任何无限可导的曲线  $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(x(t), y(t), z(t))$ , 都可以在一点  $t=a$  处做泰勒展开:

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mathbf{r}^{(n)}(a)(t-a)^n}{n!}, \text{ 设 } \mathbf{r}(t) \text{ 上有一点 } P_0,$$

$P_0$  与邻接的  $2q$  个点组成一个抗噪区间  $P = \{P_{-q}, P_{-q+1}, \dots, P_0, \dots, P_{q-1}, P_q\}$ , 又设  $P_0 = \mathbf{r}(0)$ , 则  $\mathbf{r}(t)$  可近似表示为

$$\begin{cases} x(t) = x'(0)t + \frac{1}{2}x''(0)t^2 + \frac{1}{6}x'''(0)t^3 \\ y(t) = y'(0)t + \frac{1}{2}y''(0)t^2 + \frac{1}{6}y'''(0)t^3 \\ z(t) = z'(0)t + \frac{1}{2}z''(0)t^2 + \frac{1}{6}z'''(0)t^3 \end{cases} \quad (2)$$

其中分别包含了  $\mathbf{r}'(0) = (x'(0), y'(0), z'(0))^T$ ,  $\mathbf{r}''(0) = (x''(0), y''(0), z''(0))^T$  和  $\mathbf{r}'''(0) = (x'''(0), y'''(0), z'''(0))^T$ , 因为  $P_0$  处的挠率  $\tau(0)$  在计算时需要这 3 个量.  $\mathbf{r}'(0), \mathbf{r}''(0), \mathbf{r}'''(0)$  都是未知量, 需要求解得出. 为了便于计算, 我们取  $\mathbf{r}'(0) = \frac{P_1 - P_{-1}}{\|P_1 - P_{-1}\|}$ .

为了计算  $\mathbf{r}''(0)$  和  $\mathbf{r}'''(0)$ , 构造能量函数:

$$E(\mathbf{r}''(0), \mathbf{r}'''(0)) = \sum_{i=-q}^q \left( \mathbf{r}(i) - \left( \mathbf{r}'(0)l_i + \frac{1}{2}\mathbf{r}''(0)l_i^2 + \frac{1}{6}\mathbf{r}'''(0)l_i^3 \right) \right)^2 \quad (3)$$

其中  $\mathbf{r}(i) = P_i$ ,  $l_i$  表示从  $P_0$  到  $P_i$  的曲线弧长, 在这里用曲线直线段长度之和近似表示:

$$\begin{cases} l_i = \sum_{n=1}^i \|P_n - P_{n-1}\|, & i > 0 \\ l_i = -\sum_{n=i}^{-1} \|P_{n+1} - P_n\|, & i < 0 \end{cases}$$

只需使得  $E(\mathbf{r}''(0), \mathbf{r}'''(0))$  达到最小, 就可以认为以  $\mathbf{r}''(0)$  和  $\mathbf{r}'''(0)$  为自由度的曲线  $\mathbf{r}(t)$  在抗噪区间  $P = \{P_{-q}, P_{-q+1}, \dots, P_0, \dots, P_{q-1}, P_q\}$  上实现了最小二乘意义下的最优拟合.

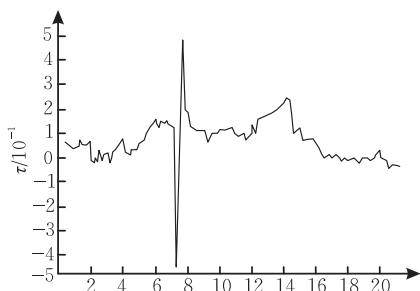
构造最小二乘方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{r}''(0)} = \sum_{i=-q}^q \left[ \mathbf{r}(i) - \left( \mathbf{r}'(0)l_i + \frac{1}{2}\mathbf{r}''(0)l_i^2 + \frac{1}{6}\mathbf{r}'''(0)l_i^3 \right) \right] l_i^2 = 0, \\ \frac{\partial E}{\partial \mathbf{r}'''(0)} = \sum_{i=-q}^q \left[ \mathbf{r}(i) - \left( \mathbf{r}'(0)l_i + \frac{1}{2}\mathbf{r}''(0)l_i^2 + \frac{1}{6}\mathbf{r}'''(0)l_i^3 \right) \right] l_i^3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

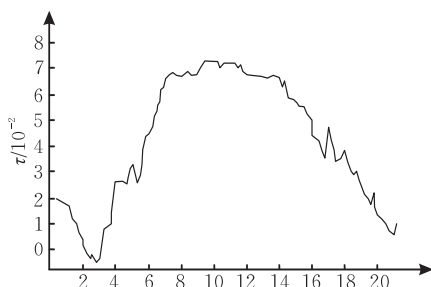
这是关于  $\mathbf{r}''(0) = (x''(0), y''(0), z''(0))^T$  和  $\mathbf{r}'''(0) = (x'''(0), y'''(0), z'''(0))^T$  中各分量的二元一次方程组, 求解得到各导数值.  $P_0$  处的挠率这样给出:

$$\tau(0) = \frac{[\mathbf{r}'(0) \times \mathbf{r}''(0)] \cdot \mathbf{r}'''(0)}{(\mathbf{r}'(0) \times \mathbf{r}''(0))^2}.$$

这样设计算法一方面计算出了轮廓曲线上每个点的挠率, 同时也充分利用附近多个点共同参与计算, 有效地消除了噪声干扰(见图 3), 为后面的匹配工作打下了坚实的基础.



(a) 傅里叶变换挠率曲线



(b) 基于抗噪区间拟合挠率曲线

图 3 基于傅立叶变换和基于抗噪区间拟合计算挠率的比较

3.2 抗噪区间的选取

抗噪区间长度的选取直接影响特征信息的平滑程度. 如果区间选择太长, 则原本变化较大的局部信息会被掩盖, 而这些信息往往是最能够表达轮廓线空间特征的部分; 如果区间选择太小则不能有效地避免噪声干扰. 需要说明的是这里的噪声首先是由于原始数据本身的局部畸变产生的, 而在挠率估计过程中表现出来的就是挠率的剧烈变化, 但是仅根据变化的程度很难判断该变化是否为非正常的(比如在原本比较平滑的部分有一处不很大的挠率变化也是不正常的, 而在原本变化剧烈的部分就更难判断某点处的挠率是否正常了), 可以肯定的是噪声的发生没有频率性, 没有可预见性, 鉴于这种情况, 我们可以做的就是根据一定原则选取相对较为合理的区间长度, 在保证特征串可比性的基础上尽量保持几何特征. 特征串并不作为精确匹配的数据, 是为了实现快速查找匹配集合. 至于最终匹配的敏感性可以通过后面的几个评价原则保证. 同时实验表明这样计算出来的特征串曲线也确实能够有效区分不同形状的边界. 对于稳定性和敏感性平衡问题, 文献[7-8]中曾经给出较为详细的阐述, 这里我们依然沿用他们的选取原则:

- 设  $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ , 表示  $P_i$  和  $P_j$  间的弦长.
1. 设  $q=1$ ;
  2. 设置  $P_0$  的抗噪区间  $P = \{P_{-q}, P_{-q+1}, \dots, P_0, \dots, P_{q-1}, P_q\}$ ;
  3. 如果满足以下条件之一, 则结束算法; 否则  $q=q+1$ , 执行步 2;
    - 3.1.  $d_{-q,q} \geq d_{-(q+1),q+1}$ ;
    - 3.2.  $q \leq n/10$ , 其中  $n$  为曲线上点的数目.

4 基于 DDTW 的拼接算法

采用上述挠率估计算法分别计算每条子轮廓线的特征串和反向特征串, 以便进行匹配检测. 设两特征串分别为  $a = \{a_i | i=1, 2, \dots, m\}$  和  $b = \{b_j | i=1, 2, \dots, n\}$ ,  $m$  和  $n$  表示两个串中元素的个数. 如果  $a_i$  和  $b_j$  的差满足一定误差范围则认为这  $a$  中的第  $i$  个点和  $b$  中的第  $j$  个点相匹配. 目前已有的匹配算法有很多种. 最简单和直接的方法就是依次比较两个串的所有元素, 获得连续匹配的部分, 也就是寻找最长公共子串的问题. 但是碎片往往会因为某些原因而缺少了边缘的某些部分, 所以这种方式在很多情况下是行不通的. 另外一类方法是寻找最长公共子

序列(LCS)<sup>[9-11]</sup>, 它是最长公共子串的一般形式, 不要求连续匹配, 允许特征串内元素的增删和局部差异, 但同时也具有一定的局限性, 比如边缘曲线弧长的计算要在同一长度度量下进行, 即两比对碎片的弧长与实际长度之比应该相等, 且采样点要尽量均匀分布于边缘上.

在实际应用中, 三维碎片几何信息的获取一般要通过三维扫描仪进行. 扫描仪的分辨率会直接影响边界数据点的数量和密度. 如果相邻的两块碎片使用了不同的扫描分辨率, 那么那些基于最长公共子序列的匹配算法就不再适用了. 还有一类情况, 就是在扫描的过程中同一碎片的不同部分会因为光栅照射角度不同而出现数据点疏密不一的情况. 遇到这两类情况, 人们通常会借助于重采样对边缘数据进行规范化处理, 但是这样一来必然会造成数据丢失, 增大误差. 所以重采样并不是很好的解决方法. 还有一类方法就是模式识别中经常用到的动态时间规整法(DTW), 它具有概念简单、算法鲁棒的优点, 早期被广泛地应用于语音识别<sup>[12]</sup>中, 并且后来也用于数据挖掘<sup>[13-15]</sup>、手势识别<sup>[16]</sup>和机器人技术<sup>[17]</sup>中, 同时在制造业<sup>[18]</sup>和医学<sup>[19]</sup>中也得到了应用. 对 DTW 而言, 即使测试序列模式与参考序列模式的时间尺度不能完全一致, 只要时间次序约束存在, 它仍能较好地完成测试序列和参考序列之间的模式匹配. DTW 中的时间尺度恰恰相当于子轮廓线中的弧长参量, 并且可以实现一对多和多对一的灵活匹配.

4.1 DTW 算法简介

给定两个待比较序列:

$$A = a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n,$$

$$B = b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m.$$

构造一个  $m \times n$  的矩阵  $P$ ,  $P$  中的元素  $(i, j)$  存放两点  $(a_i, b_j)$  的欧氏距离, 同时元素  $(i, j)$  也标志了  $a_i, b_j$  的对应关系, 于是从元素  $(1, 1)$  到元素  $(m, n)$  之间会有很多条路径, 每条路线总长度表示为  $W = w_1 + w_2 + \dots + w_K$ , 其中  $\max(m, n) \leq K \leq m + n - 1$ , 表示路径上元素的个数.

路径的选取也不是任意的, 首先应满足几个约束条件:

- (1) 路径应该以元素  $(1, 1)$  为起点, 以元素  $(m, n)$  为终点;
- (2) 确定好路径上一个元素后, 下一个元素要在当前元素的正上、右上和右侧 3 个相邻元素中选择, 这样可以确保时序的正确性.

根据约束条件进行路径选择之后会出现多于一条的路径集合,这里筛选的原则就是对应点平均距离达到最小; $DTW(A,B)=\min\left\{\sqrt{\sum_{k=1}^K\tau\omega_k/K}\right\}$ .

4.2 改进的 DTW 算法在三维碎片匹配中的应用

近年来又出现了改进的 DTW 算法,如本文采用的导数动态时间规整(DDTW)法<sup>[20]</sup>,该算法增强了 DTW 对局部变化的适应性.图 4 中(a)为两条长

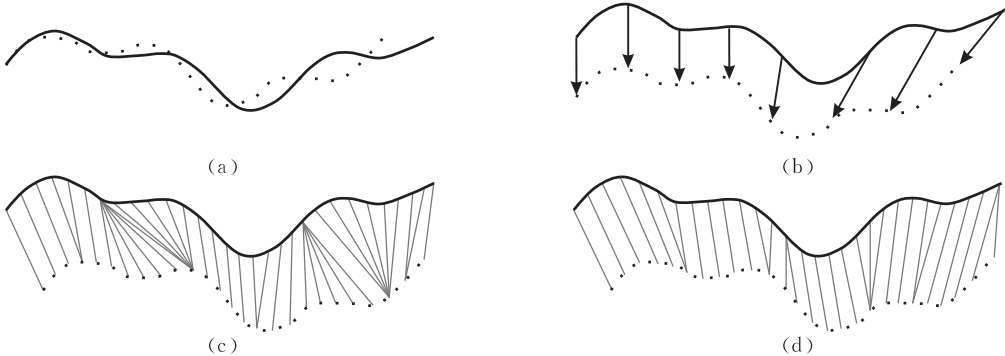


图 4 DDTW 方法与 DTW 方法的效果比较

由于文物是有厚度的,所以在拼接一个断面的时候首先要确定两条轮廓线(曲线对),然后在匹配中对两条轮廓线都要进行比较.匹配度的计算方式就是:对于一块碎片的每一个断面要分别使用 DDTW 算法计算两条轮廓线的匹配度  $S_1$  和  $S_2$ ,因为  $S_1$  和  $S_2$  在匹配过程中重要性是相同的,所以对于该断面的总体匹配度确定为  $S=(S_1+S_2)/2$ .

在匹配之后三维碎片并没有真正拼接到一起,因为碎片的尺寸没有进行放缩处理,而且碎片也没有摆放到同一坐标系中的适当位置.对于第一个问题,首先应该在匹配过程中记录最优匹配子串,然后计算两个子串端点间的弦长之比,最后以此比值作为一块碎片相对于另一块碎片的放缩比例进行放缩操作.第二个问题可以使用文献<sup>[11]</sup>中的基于单位四元数的绝对定位方法计算出刚体变换矩阵,把一块碎片对齐到另一碎片上面.

4.3 基于三角化的近似重叠检测算法

在对齐操作完成后有可能会出错误的匹配,比如两块碎片出现互相重叠的情况(见图 5 中的(c)和(d)).针对这种情况,本文提出了一种基于三角化的近似重叠检测方法.考虑到一般将一段比较平直的边缘曲线作为一段子轮廓线,所以可以把一条子轮廓线近似地看作一条直线,于是一块碎片可以看作是一个三维空间多边形.直接进行两个三维多边形的重叠判断是困难而又不准确的.可以先将两个多边形分别作带边界约束的三角化(见图 6),划分

度有差异的相似串,(b)为两个串应该具备的对应关系,(c)为 DTW 方法找到的对应关系,(d)为 DDTW 方法找到的对应关系,显然 DDTW 方法的结果更加合理.同时 DDTW 保持了  $O(mn)$  的时间复杂度.作为运算结果 DDTW 算法会在最优匹配发生时给出一个最小扭曲值,这给该算法的应用提供了极大的方便.

为若干三角片,然后分别判断每对三角片是否重叠,这样处理使得问题得到了简化,而且分别判断每对三角片是否重叠会让判断结果更加准确.判断两三维三角片是否重叠有很多种方案,但都具有一定的主观性,我们的方式是将一个三角片所在平面作为投影平面,将另外一个三角片垂直投影到该平面得到投影三角片,然后判断投影平面上的两个三角片是否存在相交的边,若存在则认为原来两个三角片重叠,否则认为不重叠.

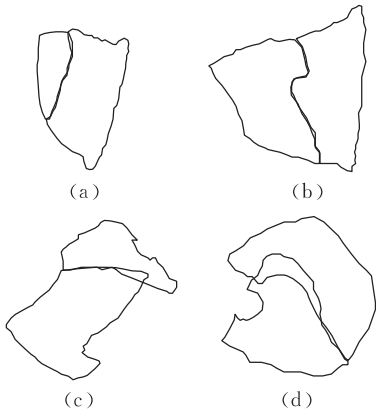


图 5 无重叠匹配和有重叠匹配

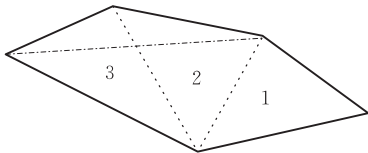


图 6 带边界约束的多边形三角化

**算法 1. 重叠检测算法.**

Overlap(多边形 1, 多边形 2)

```

{
    任意选取一个多边形上的一个顶点, 并与邻接的两个
    顶点形成第一个三角片;
    while (仍存在度为 2 的顶点)
    {
        以新选取的边为新三角片的一边, 连接该边两端
        点邻接的两新顶点形成两个新的三角片, 设新三
        角片的三个角分别为  $\alpha, \beta, \gamma$ , 则选取形状更接近正
        三角形的一个作为选定的新三角片, 选择的原则
        就是使  $E = (\alpha - 60)^2 + (\beta - 60)^2 + (\gamma - 60)^2$  最小
        (图 6 中排除点划线所示选择方案);
    }
    重复上述过程对另一个多边形进行三角化;
    经过上述处理两个多边形分别被划分为两个三角片
    集合  $T_1, T_2$ ;
    for (所有属于  $T_1$  的三角片  $Tri_1$ ) do
        for (所有属于  $T_2$  的三角片  $Tri_2$ ) do
        {
            if ( $Tri_1$  和  $Tri_2$  重叠) then return true;
        }
    return False;
}

```

实验表明, 该算法能够将绝大多数重叠情况检测出来, 并且基本没有将无重叠的情况判断为重叠. 同时该算法的执行不受轮廓曲线数据量的影响, 可在常数时间内完成, 效率很高.

**4.4 两块碎片拼接的完整算法**

经过碎片尺寸的调整、空间位置方向的变换以及重叠检测的排除, 两块碎片已经能够拼接到一起了, 但有时这种拼接仍然不能作为最终的拼接结果. 我们还需要附加一些经验性原则才能得到更合理的拼接结果. 这些原则主要包含:

(1) 误差评价. 指的是碎片进行拼接之后对应子轮廓线上的点应具有较小的距离误差, 即点集间的吻合度要高,

(2) 局部变化度评价. 两块碎片拼接处若具有较大的曲折变化则更好. 首先确定两碎片吻合部分的所有点, 对于每个点求其与相邻两顶点构成三角形的面积, 然后将所有这些面积求和得到近似曲折能量, 能量越大则越符合该评价标准. 此评价标准能够避免将那些平直的非断面拼接在一起, 而是有选择地把一般化的弯曲断面拼接起来.

(3) 公共部分长度评价. 两块碎片公共部分越

长越好, 也就是说吻合部分内点的数量占整个碎片点集的百分比要大.

以上评价原则均可在线性时间内完成计算.

综合上述各部分内容, 最终得到两块碎片完整的拼接算法.

**算法 2. 拼接算法.**

Match(碎片 1, 碎片 2)

```

{
    提取两碎片边缘轮廓  $C_1, C_2$ , 查找角点, 因为碎片的
    每个断面有两条轮廓线, 所以划分得四组子轮廓线集
    合(因为碎片的每个断面有两条轮廓线):  $C_{11} = \{C_{11}^i |$ 
     $i = 1, 2, \dots, m\}$ ,  $C_{12} = \{C_{12}^i | i = 1, 2, \dots, m\}$ ,  $C_{21} =$ 
     $\{C_{21}^j | j = 1, 2, \dots, n\}$  和  $C_{22} = \{C_{22}^j | j = 1, 2, \dots, n\}$ ;
    计算每条子轮廓线的挠率特征串;
    for  $C_1$  的每条子轮廓线对  $(C_{11}^i, C_{12}^i)$  do
        for  $C_2$  的每条子轮廓线  $(C_{21}^j, C_{22}^j)$  do
        {
            if  $((C_{11}^i, C_{12}^i), (C_{21}^j, C_{22}^j))$  存在 DDTW 匹配
            match) then
            {
                若有匹配存在, 则对  $(C_{21}^j, C_{22}^j)$  所属碎片进行
                放缩和刚体变换, 将其对接到  $(C_{11}^i, C_{12}^i)$  所属
                碎片上;
                if  $(\text{Overlap}(C_1, C_2)) = \text{FALSE}$  then
                    // 两碎片不重叠
            }
        }
    }
    对 matchList 中记录的所有匹配按照评价标准排列
    优劣次序, 选择最好的作为最终结果返回;
}

```

**5 总结与展望**

多组实际数据的测试表明本文方法计算简单, 鲁棒性强, 可以在  $O(mn)$  时间内找到两块碎片之间合理和较为精确的匹配结果. 这给以后的全局匹配研究提供了有力的支持. 图 7 展示的是几组使用本文方法进行实际数据匹配的结果. 今后的努力方向就是以本文的工作为基础, 继续研究并实现多碎片全局最优自动拼接. 随着该技术的成熟, 必将会给相关行业提供极大的方便.



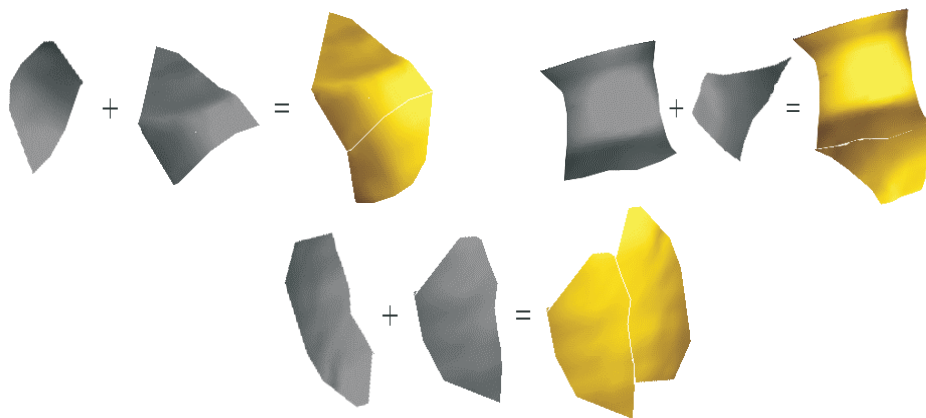


图 7 实验结果

## 参 考 文 献

- [1] Martin K, Robert S. On 3D mosaicing of rotationally symmetric ceramic fragments//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04). Cambridge, United Kingdom, 2004, 2: 265-268
- [2] Ucoluk G, Toroslul H. Automatic reconstruction of broken 3-D surface objects. Computers and Graphics, 1999, 23(4): 573-582
- [3] Kong W, Kimia B B. On solving 2D and 3D puzzles using curve matching//Proceedings of the CVPR. Hawaii, USA, 2001: 583-590
- [4] Pan Rong-Jiang, Meng Xiang-Xu, Tu Chang-He. Fragment re-assembly based on LCS matching. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(3): 350-356(in Chinese)  
(潘荣江, 孟祥旭, 屠长河. 一种基于 LCS 的物体碎片自动拼接算法. 计算机学报, 2005, 28(3): 350-356)
- [5] Mokhtarian F, Mackworth A K. A theory of multi scale, curvature-based shape representation for planar curves. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(8): 790-805
- [6] Medina R, Wahle A, Olszewski M E, Sonka M. Curvature and torsion estimation for coronary artery motion analysis//Proceedings of Medical Imaging 2004: Physiology, Function, and Structure from Medical Images. San Diego, CA, USA, 2004, 5369: 504-515
- [7] Peng Jia-Gui, Chen Qing. Differential Geometry. Beijing: Higher Education Press, 2002(in Chinese)  
(彭家贵, 陈卿. 微分几何. 北京: 高等教育出版社, 2002)
- [8] Rosenfeld A, Johnston E. Angle detection in digital curves. IEEE Transactions on Computer, 1993, C-22(9): 875-878
- [9] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. Introduction to Algorithms. 2nd Edition. USA: The MIT Press, 2001
- [10] Greenberg R L. Fast and simple computation of all longest common subsequences. Computer Science, DS/0211001, 2002, 11: 1-8
- [11] Horn B K P. Closed-form solution of absolute orientation using quaternions. Journal of Optical Society of America, 1987, 4(4): 629-642
- [12] Rabiner L, Juang B. Fundamentals of Speech Recognition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993
- [13] Keogh E, Pazzani M. Scaling up dynamic time warping for datamining applications//Proceedings of the 6th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Boston, 2000
- [14] Yi B, Jagadish H, Faloutsos C. Efficient retrieval of similar time sequences under time warping//Proceedings of the International Conference of Data Engineering. Orlando Florida, USA, 1998: 201-208
- [15] Berndt D, Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series//Proceedings of the AAAI-94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases (KDD-94). Seattle, Washington, 1994: 359-370
- [16] Gavrilu D M, Davis L S. Towards 3-D model-based tracking and recognition of human movement: A multi-view approach//Proceedings of the International Workshop on Automatic Face- and Gesture-Recognition. IEEE Computer Society, Zurich, 1995: 272-277
- [17] Schmill M, Oates T, Cohen P. Learned models for continuous planning//Proceedings of the 7th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics. Florida, USA, 1999: 278-282
- [18] Gollmer K, Posten C. Detection of distorted pattern using dynamic time warping algorithm and application for supervision of bioprocesses. On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, 1995
- [19] Caiani E G, Porta A, Baselli G, Turiel M, Muzzupappa S, Pieruzzi F, Crema C, Malliani A, Cerutti S. Warped-average template technique to track on a cycle-by-cycle basis the cardiac filling phases on left ventricular volume. IEEE Computers in Cardiology. NY, USA, 1998, 25:73-76
- [20] Keogh E J, Pazzani M J. Derivative dynamic time warping//Proceedings of the 1st SIAM International Conference on Data Mining (SDM-2001). Chicago, IL, USA, 2001: 209-211



**GAO Jian**, born in 1977, Ph. D. candidate. His research interests include computer graphics, computational geometry and image processing.

**ZHANG Cai-Ming**, born in 1955, Ph. D. , professor, Ph.D. supervisor. His research interests include computer graphics, computer-aided geometry design, computational

visualization and medical image processing.

**MENG Xiang-Xu**, born in 1962, Ph. D. , professor and Ph.D. supervisor. His main research interests include computer software and theory, human-computer interaction & virtual reality, computer graphics, CIMS, CAD/CAM.

**FENG Zhi-Quan**, born in 1964, Ph. D. , professor. His research interests include graphics and image processing, VR, human-computer interaction and tracking moving 3D hand.

**Background**

This work is supported by the National Key Basic Research 973 Program of China (2006CB303102), the National Nature Science Foundation of China ( Nos.60673003, 60633030). In this project, 3D objects are scanned into 3D point cloud. Among these objects, lots of them are fragmented. If we assembly them by hand, it would take a long period of time. Thus, we scan the fragments separately and plan to assembly them with computer. There are two key points in this problem. One is to find a feature from the 3D point

data set, and it must be robust, invariant and computable. Here the authors choosed the torsion to be the feature parameter. The other is to find the best match within each fragment pair. With respect to the abnormity of the data, the matching method must be robust and can give error matches as few as possible. The DDTW based process appears to be appropriate, with the help of overlapping check method. Finally, the matching work is left to computer. Now the authors are continuing their work on 3D point data processing.