

# 一种三维表面重构中的轮廓集拼合新方法<sup>\*</sup>)

黄魁东 张定华 王 凯 毛海鹏

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 西安 710072)

**摘要** 针对切片级三维表面重构中的难点,提出了一种拼合轮廓集的新方法:通过对待拼合的轮廓集首尾轮廓进行平面三角剖分方向的判别,将空间轮廓集拼合的三维问题转化为平面多连通域三角剖分的二维问题,并改进了现有的平面多连通域三角剖分算法,巧妙地解决了切片级重构中的轮廓分支对应问题。实验表明,该方法能准确完成复杂轮廓集的表面拼合,具有良好的适应性。

**关键词** 轮廓集拼合,三维表面重构,平面三角剖分

## A New Method of Merging Contoure Groups in 3D Surface Reconstruction

HUANG Kui-Dong ZHANG Ding-Hua WANG Kai MAO Hai-Peng

(Key Lab of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** To resolve the problems in slice-based surface reconstruction, a new method of merging contoure groups is proposed in this paper. Through distinguishing the planar triangulation direction of the head and tail contours in contoure groups which would be merged, the 3D matter of merging contoure groups is transformed into the 2D matter of arbitrary planar domain triangulation. And the arbitrary planar domain triangulation algorithm in existence is improved. So the problem of contour diverging and pairing in slice-based surface reconstruction is skillfully solved. The experiment indicates that the complex contoure groups can be merged accurately by the method. Therefore the method has good adaptability.

**Keywords** Merging contoure groups, 3D surface reconstruction, Planar triangulation

## 1 引言

切片图像的三维可视化包括面绘制和体绘制两大类方法。体绘制不能很好地表现空间层次,给人们理解数据造成困难,而且当数据量较大时在一般微机上难以实现;面绘制一般以表面三角网格表示物体的三维形体,精度较高。

面绘制的表面重构方法主要有两类:体素级重构和切片级重构。体素级重构主要采用移动立方体法(Marching Cubes)<sup>[1]</sup>、移动四面体法(Marching Tetrahedra)<sup>[2]</sup>、剖分立方体法(Dividing Cubes)<sup>[3]</sup>,其构造的三角面片是待求等值面的近似表示,且当三维数据场的密度很高时,重构产生的大量小三角面片将导致难以交互显示,若压缩三角面片则进一步降低了构造精度。切片级重构主要采用封闭轮廓拼接的方法<sup>[4]</sup>,后来又研究了一些改进方法<sup>[5~7]</sup>,一般包括轮廓对应、分支、拼接三个相互联系的子问题,目前并没有完全解决。由于切片级重构对轮廓进行了匹配和分割,可利用二维轮廓序列辅助识别零件的三维特征,多用于具有较规则形体的工业产品的反求建模和结构分析。

本文首先简单介绍了一般前端数据获取与处理方法,然后提出一种将分割好的轮廓集拼合成完整三维表面的新方法,最后用实例对算法进行验证。

## 2 前端数据获取与处理

### 2.1 轮廓提取

轮廓提取是指从切片图像中提取检测对象的封闭边界线,一般包括边缘检测和轮廓跟踪两步。利用数字图像处理技术提取边缘轮廓的方法很多,为了获取较高的提取精度,目前国内外已提出了多种2D亚像素滤波器和3D亚像素滤波器。2D亚像素边缘滤波器单独对每一幅2D切片图像进行处理,使边缘点落在像素的正方形区域内,达到亚像素级精度;而3D亚像素边缘滤波器对相邻的若干幅图像进行处理,使边缘点落在体素的立方体区域内,达到亚体素级精度<sup>[8]</sup>。

边缘检测、轮廓跟踪后还需重构轮廓的拓扑信息,包括轮廓的方向、嵌套关系和内外性质等,一般规定外表面轮廓按逆时针走向、内表面轮廓按顺时针走向。由于轮廓点数量庞大,需要在满足重构精度的前提下,对轮廓线上的数据点进行保形逼近<sup>[9]</sup>。

### 2.2 轮廓集分割及三角剖分

轮廓集分割是指将切片序列中连续的具有一定相似性的轮廓提取出来形成若干轮廓集,其方法主要有:基于截面属性的轮廓分割、采用弹性样条匹配技术的轮廓分割、采用串匹配的轮廓分割<sup>[10]</sup>、基于遗传算法的轮廓模糊匹配<sup>[11]</sup>。基于截面属性的分割计算效率较高,但是当轮廓形状复杂时常不能

<sup>\*</sup> 基金项目:总装备部预先研究资助项目(41318.1.1.7)。黄魁东 博士研究生,主要研究方向:锥束CT、计算机图形图像处理;张定华 教授,博士研究生导师,主要研究方向:CIMS、锥束CT、计算机图形图像处理、数控加工技术;王 凯 博士研究生,主要研究方向:锥束CT、计算机图形图像处理;毛海鹏 博士研究生,主要研究方向:CAD/CAM、锥束CT、计算机图形图像处理。

进行正确分割;弹性样条匹配技术适合于自由曲面断层轮廓集的分割,但计算效率较低;串匹配和遗传算法模糊匹配正确性较高,分割效率低。

轮廓集三角剖分是指用三角面片连接分割轮廓组中已匹配的相邻层轮廓,得到多个局部特征表面,目前常用的方法有体积最大法、对角线最短法、最小极角法、同步前进法<sup>[12]</sup>。

### 3 轮廓集拼合

由于基于非连续切片的三维表面重构在分支处理时存在固有的不唯一性问题,易产生与实际物体不符的结果,而序列切片具有空间连续、切片厚度小的特点。据此,本文首先改进了现有的平面多连通域三角剖分算法,然后将其应用于轮廓集拼合算法中二维和三维轮廓边的三角剖分,很好地解决了切片级重构中的轮廓分支对应问题。

#### 3.1 平面多连通域的三角剖分

平面多连通域的三角剖分就是将平面多边形划分成一系列不相重叠的三角形且不产生新的顶点。本文改进了文<sup>[13]</sup>提及的算法,提高了算法效率和稳定性。具体算法如下:

- 1) 确定外轮廓为逆时针方向,内轮廓为顺时针方向;
- 2) 生成待剖分边链表 Tobe,将所有轮廓边加入链表中;
- 3) 生成已剖分三角形边链表 Formed;
- 4) 取 Tobe 的第一条边 AB,建立链表 LeftPtList,记录 Tobe 中位于此边左边的点,并将点按  $(|BC| + |CA|)$  的大小从小到大排序;

5) 从 LeftPtList 中的第一个点 C 开始,检查边 BC 和 CA 是否与轮廓边和新生成的边相交,如果相交则将点 C 置为 LeftPtList 中的下一个点,否则,生成三角形  $\triangle ABC$  并从 Tobe 中删除  $\triangle ABC$  的边,将  $\triangle ABC$  的边加入 Formed 中,如果  $\triangle ABC$  中存在新生成的边,则将新边反向后加入 Tobe 中,将链表 LeftPtList 清空;

- 6) 如果 Tobe 为空,结束,否则,转 4。

由于存储表面重构结果的 STL 格式文件要求三角形三个顶点的排列顺序与法矢量满足右手准则且法矢量指向实体外部,因此上述算法得到的三角剖分是向上的。物体朝上的平面的三角剖分可直接采用上述算法,若剖分朝下的平面,则在第 1 步时须将内外轮廓反向,第 4 步时查找 Tobe 边右边的点。

#### 3.2 轮廓集拼合算法

轮廓集拼合即将轮廓集三角剖分得到的多个特征表面在空间拼合成一个完整的物体表面。其难点在于,由于实际物体结构的多样性,待拼合的内外特征面一般存在轮廓突变或分支,因此拼合的结果易出现拓扑错误。本文对此提出一种新算法,具有很好的适应性,具体算法如下:

- 1) 搜索全部分割轮廓集,将其首尾轮廓分别组成首轮廓链表 HeadList、尾轮廓链表 TailList(底层、顶层轮廓除外);
- 2) 将 HeadList 中的轮廓全部反向,并生成 Tobe1、Tobe2 两个链表,Tobe1 用于存放向上的待剖分轮廓边,Tobe2 用于存放向下的待剖分轮廓边;

3) 如果 TailList 为空,转 7,否则,取 TailList 的第一条轮廓,设此轮廓位于第  $i$  层切片,找出 TailList 中其余的  $i$  层切片轮廓,查找 HeadList 中的  $i+1$  层切片轮廓,若有,转 5,否则,转 4;

4) 按表 1 所示的尾轮廓平面三角剖分方向判断规则将轮廓边对应加入 Tobe1 和 Tobe2,删除 TailList 中的  $i$  层轮廓,转 6;

5) 将  $i$  和  $i+1$  层切片轮廓投影到两层之间的一个切平面  $P$ (如图 1),在  $P$  中, $i$  层轮廓对  $i+1$  层轮廓两两求交,交点分别插入两轮廓相应位置;若有重合轮廓边,将其按轮廓集三角剖分的方法处理;若有不与其它轮廓相交的轮廓,依首、尾轮廓按表 1 所列规则将轮廓边对应加入 Tobe1 和 Tobe2;对相交轮廓,以交点将相交轮廓划分成若干轮廓段,按表 2 所列规则将轮廓段边对应加入 Tobe1 和 Tobe2(对  $i$  层的相交轮廓段须作下文所述的特殊处理),分别删除 TailList、HeadList 中的  $i, i+1$  层轮廓。对图 2 所示的复杂首尾相交轮廓(粗线表示  $i$  层轮廓,细线表示  $i+1$  层轮廓),由上述算法可得:1、4、6、8、10、12、14 标识的封闭轮廓边平面三角形剖分方向向上,其余标识区域则向下;

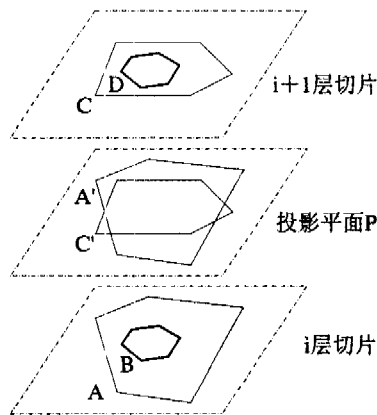


图 1 相邻层首尾轮廓求交示意图

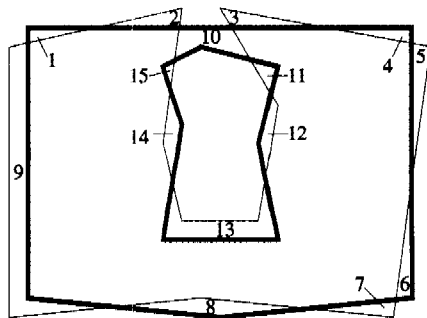


图 2 相交首尾轮廓的三角剖分方向示例

6) 采用 3.1 的算法分别三角剖分 Tobe1 和 Tobe2 中的轮廓边,转 3;

7) 如果 HeadList 为空,转 8,否则,将 HeadList 中剩余的各切片层轮廓逐层按表 1 所示的首轮廓平面三角剖分方向判断规则,将轮廓边对应加入 Tobe1 和 Tobe2,采用 3.1 的算法分别三角剖分 Tobe1 和 Tobe2 中的轮廓边;

8) 分别向下、向上平面三角剖分底层、顶层切片轮廓,结束。

表 1 首尾轮廓平面三角剖分方向判断规则

| 轮廓  | 投影到上一层切片 |   | 投影到下一层切片 |   |
|-----|----------|---|----------|---|
|     | 内        | 外 | 内        | 外 |
| 首轮廓 | 外轮廓      | 下 |          |   |
|     | 内轮廓      |   |          |   |
| 尾轮廓 | 外轮廓      | 上 |          | 下 |
|     | 内轮廓      | 下 | 上        |   |

表 2 轮廓段平面三角剖分方向判断规则

| 轮廓段        | 首尾交于外轮廓 |   | 首尾交于内轮廓 |   | 首尾交于内外轮廓 |
|------------|---------|---|---------|---|----------|
|            | 内       | 外 | 内       | 外 |          |
| 与所交轮廓的内外关系 | 内       | 外 | 内       | 外 |          |
| i层轮廓       | 外轮廓     | 下 | 上       | 下 | 下        |
|            | 内轮廓     | 上 | 下       | 上 | 上        |
| i+1层轮廓     | 外轮廓     | 上 | 下       | 上 | 上        |
|            | 内轮廓     | 下 | 上       | 下 | 下        |

对于同层切片的轮廓,可以直接采用 3.1 的算法,为了能对相邻两层的轮廓也不加修改地采用 3.1 的算法进行空间三角剖分,即将空间轮廓集拼合的三维问题转化为平面多连通域三角剖分的二维问题,需要在算法第 5 步中对 i 层的相交轮廓段作如下特殊处理(以图 3 为例说明):

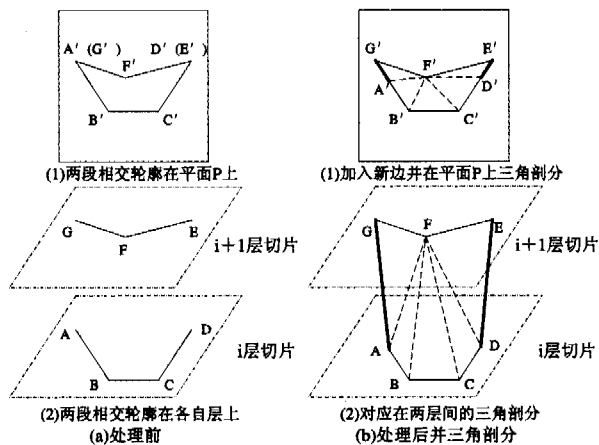


图 3 将 3.1 算法用于空间三角剖分时的处理

- 1) 将 i 层轮廓段的首边 A'B'、尾边 CD' 缩短一定距离, 加入新边 GA'、DE';
- 2) 采用 3.1 的算法对多边形 ABC'D'E'FG' 进行三角剖分;
- 3) 在剖分产生的三角形中将 A、D 点的坐标恢复成原来的值。

#### 4 算法验证

为验证本文新算法的有效性,采用一组具有复杂内外结构特征的锥束 CT 仿真数据进行三维表面重构;切片 219 层,切片分辨率 512×512,切片厚度 0.256mm。图 4 给出了部分 CT 切片图像,从中可见相邻层切片轮廓有明显的突变和分支。从图 4 提取的切片轮廓如图 5 所示。

对提取的切片轮廓进行多边形逼近(逼近误差  $\mu < 0.01$  mm),然后采用椭圆匹配法<sup>[17]</sup>进行轮廓分割,共分割出轮廓集 27 个,即零件具有 27 个基本结构。对轮廓集进行三角剖分得到基本结构表面,如图 6 所示。

92 与 93 层切片轮廓的突变和分支比较特殊,一般的轮廓分支对应算法易出现错误的拓扑连接。为验证本文算法的适应性,特别对 98~111 层切片轮廓进行轮廓分割与拼合,拼合结果如图 7 所示。图中给出了整体和局部放大的渲染图及对应的线框图,可以看出,本文提出的算法能够准确地对其进行处理,具有很好的适应性。图 8 为所有轮廓集拼合后的整体三维表面,零件的各特征型面拓扑连接正确。

**结论** 本文提出的拼合三维表面重构中的分割轮廓集的新方法,将改进的平面多连通域三角剖分算法不加修改地应

用于二维和三维轮廓边的三角形剖分,很好地解决了切片级三维表面重构中的轮廓突变和分支部位表面拼合的难题。实验表明,该方法稳定性好,适应性强,可应用于工程实际。

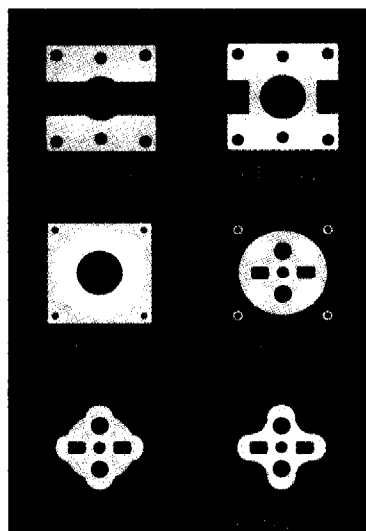


图 4 部分 CT 切片图像

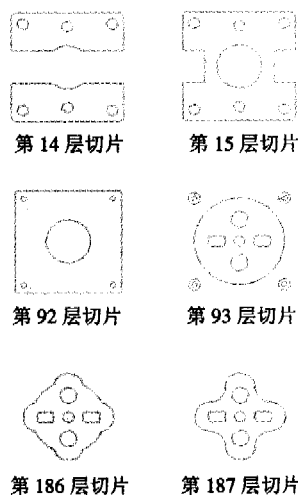


图 5 提取的切片图像轮廓

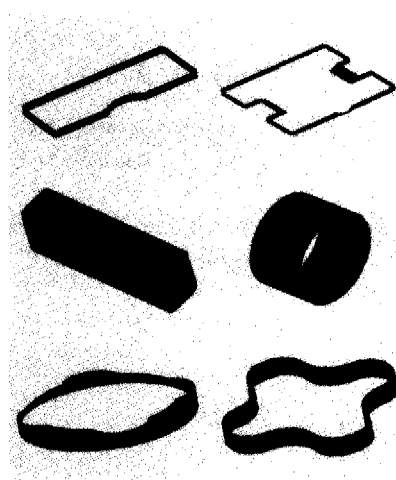


图 6 部分分割轮廓集表面

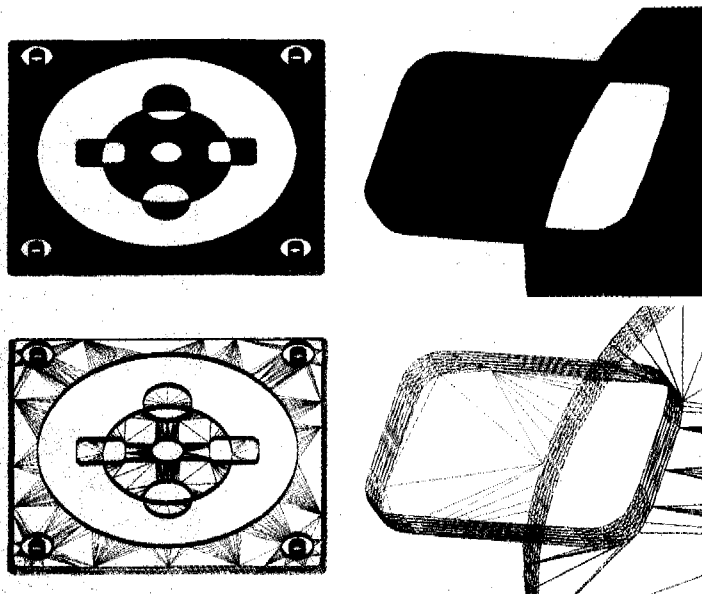


图7 98~111层切片轮廓拼合结果(未封闭上下表面)

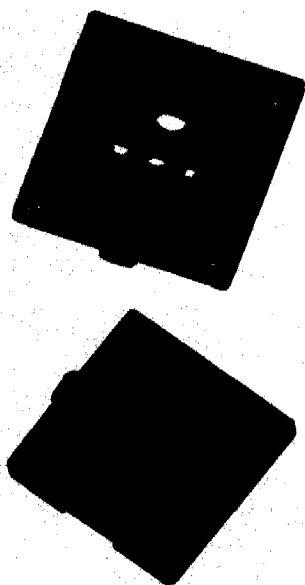


图8 整体重构结果

### 参考文献

- 1 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163~169
- 2 Doi A, Koide A. An efficient method of triangulating equi-valued surfaces by using tetrahedral cells [J]. IEICE Transactions, 1991, E74(1): 214~224

- 3 Cline H E, Lorensen W E. Two algorithms for the 3D reconstruction of tomograms [J]. Medical Physics, 1988, 15(3): 225~233
- 4 Keppel E. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines [J]. IBM Journal of Research and Development, 1975, 19(1): 2~11
- 5 Kehtarnavaz N, De Figueiredo R J P. A framework for surface reconstruction from 3D contours [J]. Computers Vision Graphics Image Processing, 1998, 42(1): 32~47
- 6 Chang L W, Chen H W, Ho J R. Reconstruction of 3D medical images: A nonlinear interpolation technique for reconstruction of 3D medical images [J]. Computer Vision Graphics Image Processing: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(4): 298~309
- 7 Meyers D, Skinner S, Sloan K. Surfaces from contours [J]. ACM Transactions on Graphics, 1992, 11(3): 228~258
- 8 王凯, 张定华, 赵敬波. 一种改进的 CT 切片图像 3-D 亚体素边缘检测算法 [C]. 见: 第五届中国计算机图形学大会论文. 西安, 2004, 9
- 9 於文雪, 罗立民. 三维人脑计算机图谱表面重建的层间轮廓线插值 [J]. 电子学报, 2000, 28(2): 52~54
- 10 元利伟, 赵毅, 李明辉. 断层测量反求工程中的封闭轮廓集分割技术 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(2): 216~219
- 11 韩逢庆, 李红梅, 张建勋, 纪纲, 刘全利. 基于遗传算法的轮廓模糊匹配问题研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 772~774
- 12 张舜德. 面向快速原型制造的反求工程若干关键技术研究 [D]. [西安交通大学博士学位论文]. 2002, 117~121
- 13 李维诗. 基于医学断层轮廓数据的反求 CAD 建模理论与方法研究 [D]. [浙江大学博士学位论文]. 2001, 21~23