

基于 X 射线断层成像的逆向工程中轮廓序列 分割算法的原理及实现^{*}

王燕芳^{1;1)} 刘力¹ 单保慈² 阎永廉¹ 唐孝威²

1 (中国科学院高能物理研究所研发中心 北京 100049)

2 (中国科学院高能物理研究所核分析室 北京 100049)

摘要 为了实现基于 X 射线断层成像(CT)的逆向工程中具有参数识别的三维图像重构, 提出了一种分割轮廓序列的新算法. 首先通过一定角度的射线法来得到轮廓间的嵌套关系, 然后采用扫描一次关系矩阵生成轮廓树的方法实现层内轮廓定位, 最后运用轮廓间定量、定性的属性判定来完成层间的轮廓匹配. 通过实例, 本文提供的算法可以准确、快速地分割 CT 零件中的轮廓序列.

关键词 X 射线断层成像 逆向工程 轮廓序列分割

1 引言

基于工业 X 射线技术的断层成像 (ICT: Industrial Computerized Tomography) 是核技术应用的一个重要领域, 随着其技术及设备的广泛应用, 逆向工程作为一门新兴学科越来越受到人们的关注与重视. “逆向工程” (Reverse Engineering, RE), 也称反求工程、反向工程等. 它是根据零件(或原型)生成图样, 再制造产品^[1]. 常用的逆向工程测量方法, 如坐标测量法、激光扫描法等, 只能对物体的外表面和简单的内部结构进行测量, 却无法测量物体复杂的内部结构. 而工业 CT 技术的发展, 很好地解决了这一关键问题^[2]. 工业 CT 断层所得到的轮廓的特点是: 每个断层包含一个或多个封闭轮廓; 处于同一层上的各轮廓互不相交, 要么是包含与被包含的关系, 要么就相互分离. 对于被测零件的某个几何结构, 由于其连续性, 对应的断层轮廓位于相邻接的多个测量层上, 并与其他几何结构的断层轮廓混杂在一起. 在这种杂乱无序的轮廓集合中, 无法针对特定的结构特征实现三维重构的参数识别^[3]. 因此, 进行轮廓序列的分割, 得到物体的各结构特征对应的多个轮廓序列, 为特定结构的几何参数识别、三维图形重构奠定基础.

本文将重点研究轮廓序列的分割算法, 并提出新的判定轮廓间的嵌套关系及生成轮廓树的算法.

2 算法思想

当物体结构为单一连续的实心结构时, 在任一断层上只有一个封闭轮廓, 这时比较容易得到只有一个封闭轮廓的轮廓序列集合. 而更一般的情况是: 由于物体内部结构的存在使得某一层上的各个轮廓出现嵌套, 断层轮廓的这种特点无疑增加了分割成各个独立轮廓序列的难度. 所以针对一般的情况, 首先要找出处于同一层上的各个轮廓间的嵌套关系, 并以一定的数据结构表示, 然后再进行相邻层间各个轮廓序列的匹配, 这样, 可以提高分割的准确性和效率.

2.1 轮廓的组织结构

如引言所介绍, 每一断层轮廓间的关系只有两种: 包含或分离. 文献 [4] 根据其特点提出树结构的轮廓组织形式, 却没有给出详细的算法. 将一个断层中的所有轮廓组织得到一棵轮廓树, 每个断层对应于一棵轮廓树, 所有断层的轮廓树形成轮廓森林. 而一棵轮廓树正体现出处于同一断层上各个轮廓间彼此的相互关

2006 - 03 - 10 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KJ CXI-SW-08)资助

1) E-mail: wangyf@mail.ihep.ac.cn

系。

生成一棵轮廓树时有两个步骤：轮廓嵌套关系的判别和根据嵌套关系生成轮廓树。

2.1.1 轮廓嵌套关系的判别及生成反映嵌套关系的矩阵

两轮廓的包含判别可采用其中一个轮廓上任取一点，若该点位于另一轮廓中，根据任两轮廓均不相交的定义，则该轮廓包含于另一轮廓中。在断层图像中解决这一问题常用射线法^[5]来判别点的包含关系。但是轮廓 A 上任一点不在轮廓 B 内只能说明轮廓 B 不包含轮廓 A，并不能说明轮廓 B 不在轮廓 A 内，因此对于断层上每一个轮廓，都必须判断其两两的位置关系。而工业 CT 中处理的每个断层都存在许多轮廓，且层的数量很多，传统的方法存在着计算量大、效率低等缺点。文献[6]提出了一种区间分割-射线扫描的方法来从整体上考虑轮廓的相互关系，首先通过轮廓边界构造区间集(由每个轮廓 Y 方向的最小和最大的像素坐标组成的区间构成)，实现区间分割，实施分区后，发送若干条水平射线，通过扫描射线所经过的轮廓序号建立断层轮廓的嵌套关系，此方法虽不需要通过点的包含来判断任意两个轮廓是否包含，但对于每一层的每个轮廓，都需要构造由 Y 方向的最小和最大像素 Y_{min} 及 Y_{max} 所组成的区间 $\rho(Y_{min}, Y_{max})$ ，这必然会增加复杂度，降低了效率。

本文在文献[6]的基础上，不拘泥于以往的水平射线，提出按一定角度的射线法来得到轮廓的嵌套关系，既不用作点的包含判别，也无需构造轮廓的区间集，大大提高了算法的效率。若某断层截面上的封闭数为 N ，如采用文献[5]常规的点的包含算法，需要发送 $N(N+1)$ 条射线；采用文献[6]的算法，也要发送 $2N+1$ 条射线；而本文采用一定角度的若干条射线来穿过该层上所有的轮廓，如图 1 所示，一条射线就可以穿过所有的轮廓，而如图 2 所示的情况，可增加一条另一角度的射线以便可以获得完整的轮廓序号链表。根据轮廓的位置，按一定角度的射线法应用起来非常灵活，且效率可观。

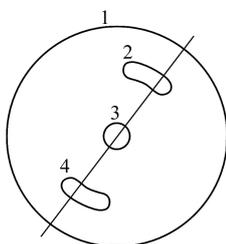


图 1 一条射线与所有轮廓相交

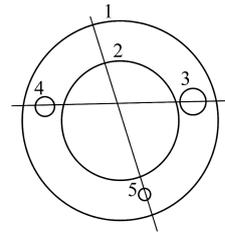


图 2 两条射线与轮廓相交

提出的算法根据射线穿过的轮廓序号，可以得到上述两图中的轮廓序号链分别是： $\{1,4,4,3,3,2,2,1\}$ ； $\{1,2,2,5,5,1\}$ 及 $\{1,4,4,2,2,3,3,1\}$ 。通过扫描轮廓序号链，由式子(1)生成嵌套关系矩阵。

设某层有 n 个轮廓，定义变量 $R(i, j)$ ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$) 为轮廓的包含关系，如下式

$$R(i, j) = \begin{cases} -1 & i \text{ 轮廓包含于轮廓 } j \text{ 中} \\ 0 & i, j \text{ 轮廓相互独立, 互不包含} \\ 1 & i \text{ 轮廓包含 } j \text{ 轮廓} \\ 2 & i = j \end{cases}, \quad (1)$$

则由此得到一个 $n \times n$ 的位置关系矩阵 $tv[n][n]$ 。详见 3.1 节的算法实现。

2.1.2 生成轮廓树

文献[3]给出依据轮廓关系矩阵生成轮廓树的算法，但是它需要对矩阵进行多次扫描，而每次扫描只析出一层轮廓。本文提出按照树型结构生成的方法扫描矩阵，只需扫描一次关系矩阵就可得到轮廓树的结构，提高了原有算法的效率。树型结构如图 3 示意。

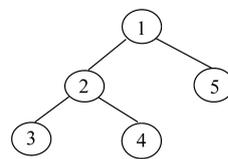


图 3 树型结构示意图

主要过程为：树型结构中每一个结点对应一个封闭轮廓的序号，由树型结构中的根结点 1(父亲结点)开始，将该轮廓序号看作矩阵中的一行值，查看该行的所有的列值，若该结点存在孩子结点，则生成一个孩子结点 2，并将该孩子结点作为新的当前结点，重复上述的过程直至当前结点不存在孩子结点，如图 3 所示的结点 3；这时若该结点存在兄弟结点，则生成一个右兄弟结点 4；若当前结点既无左孩点也无右兄弟结点，则返回当前结点的父亲结点 2，继续依据矩阵判定该结点是否存在兄弟结点，若有，则生成结点 2 的右兄

弟结点5;若当前结点既无孩子结点又无兄弟结点,且其父亲结点的兄弟结点为空,则整个循环结束,生成一棵反映轮廓间嵌套关系的轮廓树.详细的判定方法见第3.1节.

2.2 轮廓序列匹配分割

分割几何结构的轮廓序列时,主要依据轮廓间的关联性.

基于截面属性的轮廓分割^[7],位于相邻两层上的、属于同一基本结构的两个封闭轮廓,具有两轮廓形心位置的垂直投影距离相近、两轮廓面积相近、两轮廓垂直投影部分重合、内外属性(某轮廓是内轮廓还是外轮廓)相同等相关属性,通过比较一个轮廓和相邻层上所有待选轮廓的上述属性,从相邻层上抽取特定的轮廓.在文献[2]中认为该方法对规则几何形状物体的断面轮廓分割是有效的,且计算效率高.但是当轮廓形状复杂,位置变化较大时,该方法通常不能进行正确分割.

基于串匹配的轮廓分割^[8,9],由轮廓各点处的曲率形成符号串,称为曲率串,以曲率串反映轮廓的形状属性,将与种子轮廓最相似的待选轮廓识别出来.串的表达方法具有平移、旋转不变性等特点.在现实世界中,物体的组成材料都是连续的,对于邻接的两个轮廓,表现为其中一个轮廓在相邻层上的垂直投影必定和另一轮廓有重合部分.文献[3]正是利用这一性质将加快轮廓分割的速度和提高分割的准确性.

对于工程领域的断层测量,为了保证精度,断层间距小,层数多.若完全按照串匹配算法进行轮廓序列的分割,那么多数的匹配都是无效匹配(在相邻层上只有一个封闭轮廓和当前层的特定轮廓匹配),所以分割效率低.若只采用基于截面属性的分割方法,又常常难以实现准确分割.为此,在文献[2]中结合了两者的算法,充分发挥基于截面属性分割速度快的优点,同时又利用串匹配分割准确的优点.

综上所述:轮廓序列的分割主要包括以下两方面的工作:(1)对某一断层上各轮廓嵌套关系进行有效地判别,给出明确的数据结构,即层内轮廓定位;(2)对相邻断层相同或相似的轮廓进行匹配,输出相匹配的轮廓,即层间轮廓匹配.

3 算法实现

3.1 生成关系矩阵及轮廓树的算法实现

在对工业CT断层数据经图像处理^[10]后得到的轮

廓图上,按某一角度发送一条可以穿过所有轮廓的射线,如图4所示:获取射线与穿过的轮廓序号的链表.如图5所示:通过扫描该序号链构造反映嵌套关系的矩阵.

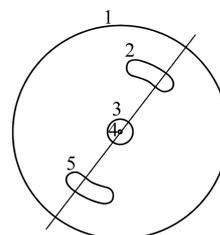


图 4 射线与轮廓相交

穿过轮廓序号链为:
{1,5,5,3,4,4,3,2,2,1}

图 5 轮廓序号链

定义一个层变量 $L = 1$. 轮廓序号链 $trackchain = \{1,5,5,3,4,4,3,2,2,1\}$, 每个轮廓有两个变量: $Layer[no]$: 表示轮廓序号 no 所对应的层次(图像中边界轮廓的层次数从最外至最内依次为: 1, 2, 3, 4, ...); $Throughtime[no]$: 表示在扫描轮廓序号链时,穿过轮廓序号为 no 的次数. 定义表示轮廓嵌套关系的矩阵变量 $tv[n][n]$, n 表示该层的轮廓总数,这里等于5. 算法描述如下:

(1) 扫描轮廓链中的第一个轮廓序号, 赋给层次变量 $Layer[no] = L$, 穿过的次数 $Throughtime[no]$ 记作 1;

(2) 依次扫描轮廓链中下一个轮廓序号 xx , 若与前一个轮廓序号 yy 相等, 则转(4); 若不相等, 且此时该轮廓序号的穿过次数 $Throughtime[xx]$ 为 0, 说明射线穿入一个新的封闭轮廓, 将层次变量 L 加 1, 赋给相对应的 $Layer[xx]$, 穿过的次数 $Throughtime[xx]$ 记作 1; 若该轮廓序号的穿过次数 $Throughtime[xx]$ 已经为 1, 说明射线是第二次经过该轮廓, 也就是表示射线穿出一个封闭轮廓, 将层次变量 L 减 1. 转(3);

(3) 比较该轮廓 $Layer[xx]$ 与前一个轮廓的 $Layer[yy]$, 若 $Layer[xx] > Layer[yy]$, 表示前一个轮廓包含该轮廓, 赋值 $tv[yy][xx] = 1$; $tv[xx][yy] = -1$; 若 $Layer[xx] < Layer[yy]$, 表示该轮廓包含着前一个轮廓, 赋值 $tv[yy][xx] = -1$; $tv[xx][yy] = 1$; 若 $Layer[xx] = Layer[yy]$, 表示两轮廓相互独立, 互不包含;

(4) 扫描到的相邻的两个轮廓序号相等, 说明该轮廓不包含其他轮廓, 对应的 $Layer[no]$ 变量值与前一个数值的 $Layer[no]$ 相同, 此时将层次变量 L 减 1. 转

至(2)继续判断直至轮廓序号链中所有的数值都扫描完毕;

(5) 步骤(3)可以将射线依次扫描到的两轮廓的关系进行判定,却不能判定当前轮廓序号与非相邻轮廓序号的嵌套关系,所以这步扫描整个关系矩阵,对没有确定嵌套关系的轮廓序号,比较轮廓序号对应的层次,判定方法与步骤(3)相同,但这时要注意当两个轮廓序号对应的层次不相等时,也可能是两轮廓相互独立,如例子中的轮廓5和轮廓4的关系.这时要增加判断包含轮廓4的轮廓3与轮廓5的关系,如轮廓3与轮廓5相互独立,那么轮廓4与轮廓5的关系也是相互独立,互不包含.这步完成后可以得到任两个轮廓的嵌套关系,生成反映轮廓嵌套关系的矩阵.如图6所示.

嵌套关系矩阵					
轮廓号	1	2	3	4	5
1	2	1	1	1	1
2	-1	2	0	0	0
3	-1	0	2	1	0
4	-1	0	-1	2	0
5	-1	0	0	0	2

图 6 轮廓嵌套关系的矩阵

接下来,将断层轮廓组织成树型结构.任一断层轮廓采用如下的数据结构:

```
typedef struct_Edge
{
    PointsContourInfo *pCoordinate;
    //轮廓顶点坐标的指针;
    BYTE Direction; //轮廓内外属性;
    BYTE EdgeNo; //轮廓序列号;
    float area; //封闭轮廓的面积;
    struct_CenterPt centerPt;
    //轮廓的形心坐标;
    struct_Edge*Parent;
    //轮廓的父结点指针;
    struct_Edge*Child;
    //轮廓的左孩子结点指针;
    struct_Edge*Brother;
    //轮廓的右兄弟结点指针;
    BOOL IsSorted;
    //标志该轮廓是否已被检索
}Edge;
```

按照式子(1)对生成的关系矩阵进行读取,生成轮廓树.描述如下:

(1) 若矩阵中某行所对应的所有元素值都大于等于1,那么该行数所代表的轮廓序号没有兄弟结点;

(2) 若矩阵中某行所对应的所有元素值中没有等于1的元素,那么该行数所代表的轮廓序号没有孩子结点;

(3) 若矩阵中某行所对应的所有元素值中没有等于-1的元素,那么该行数所代表的轮廓序号没有父亲结点;

(4) 读取关系矩阵中某行所对应的各列元素时,遇到第一个元素值为1的列时,将该列所代表的轮廓序号作为该行所代表的轮廓序号的左孩子结点;

(5) 读取关系矩阵中某行所对应的各列元素时,遇到最后一个元素值为-1的列时,将该列所代表的轮廓序号作为该行所代表的轮廓序号的父亲结点;

(6) 读取关系矩阵中某行所对应的各列元素时,遇到第一个元素值为0的列且该列所代表的轮廓序号与该行所表示的轮廓序号的父亲结点相同时,将该列所代表的轮廓序号作为该行所代表的轮廓序号的右兄弟结点.

算法结束后,即可得到轮廓树的数据结构.如图7所示.



图 7 生成的轮廓树结构

3.2 实现轮廓序列的分割

3.2.1 轮廓截面属性的计算:包括轮廓形心位置及面积

$f(x,y)$ 是 $N \times N$ 大小的图像中 (x,y) 对应的灰度值,形心位置由如下公式^[11]给出:

$$x_c = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} x \cdot f(x,y)}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)}, \quad (2)$$

$$y_c = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} y \cdot f(x,y)}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)}. \quad (3)$$

封闭轮廓的面积由如下公式^[12]给出

$$\text{area} = \frac{1}{2} \left| \sum_{k=0}^{N-1} (i_k j_{k+1} - i_{k+1} j_k) \right|, \quad (4)$$

其中封闭轮廓的顶点用 (i_k, j_k) 来表示, N 代表顶点的个数.

3.2.2 分割算法过程

(1) 在当前层上选取某个轮廓作为种子轮廓;

(2) 判断种子轮廓的垂直投影在相邻层上是否重合部分, 若存在, 则说明相邻层上可能存在与种子轮廓相匹配的目标轮廓; 跳转至(3)进一步判断; 若不存在, 则相邻层上没有可匹配的轮廓, 分割结束;

(3) 比较种子轮廓与候选轮廓的形心位置、面积大小是否相近? 若只有一个轮廓满足条件, 则输出相匹配的轮廓, 转(5); 若多于一个轮廓满足条件, 转(4)进一步判断; 若没有满足条件的轮廓, 分割结束;

(4) 对于(3)步得到候选轮廓, 计算各轮廓的曲率串, 采用串匹配的算法, 找出与种子轮廓形状最相近的目标轮廓, 输出;

(5) 将新得到的目标轮廓作为新的种子轮廓, 相邻层号加1, 转(2)继续处理.

4 实例与结果

将上述算法应用于实际零件中, 如图8所示, 得到各个主要的轮廓序列, 如图9—11所示. 数据来自中国科学院高能物理研究所工业XCT样机, 实物为一个铝制的标准凹半腔.

如图10所示的轮廓序列图中, 对于4个轮廓数, 文献[5]的射线法需要发射20条射线才能得到任两轮廓的嵌套关系, 而文献[6]中的算法首先对每个轮廓构造区间, 再在每个区间的中点发射一条射线再进行判定. 本文改进的算法依据轮廓间的位置关系, 只需发射一条射线就可以得到反映轮廓间嵌套关系的矩阵, 效率明显提高; 在按照树型结构生成的方法扫描一次矩阵后就生成了轮廓树的数据结构, 比文献[3]提供的扫描方法效率提高了 N 倍 (N 为某一断层中的轮廓总

数, 本例中为4), 即在原方法所需的1/4的时间内可获得同样的分割结果.



图 8 零件



图 9 零件底层的轮廓序列



图 10 零件内腔的轮廓序列



图 11 零件侧面结构的轮廓序列

5 结束语

针对工业CT断层图像中各个结构特征的轮廓都嵌套在一起, 且层数多、数据量大的特点, 本文提供的分割算法可以准确地得到各结构特征对应的多个轮廓序列, 其中的一定角度的射线法及生成轮廓树的实现方法大大提高了原有算法的效率. 算法稳定性好且适用于复杂零件轮廓序列的分割, 可在基于工业CT的逆向工程软件中使用.

参考文献(References)

- JIN Tao, TONG Shui-Guang et al. Reverse Engineering. Beijing: China Machine Press, 2003. 1—2 (in Chinese)
(金涛, 童水光等. 逆向工程技术. 北京: 机械工业出版社, 2003. 1—2)
- QI Li-Wei, ZHAO Yi, LI Ming-Hui. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(2): 216—219 (in Chinese)

(元利伟, 赵毅, 李明辉. 上海交通大学学报, 2003, 37(2): 216—219)

- QI Li-Wei. Key Technologies of Reverse Engineering Oriented to Layer Measuring Data. Doctor Paper of Shanghai Jiaotong University, 2002. 23—40 (in Chinese)
(元利伟. 断层测量反求工程的关键技术. 上海: 上海交通大学博士论文, 2002. 23—40)

- 4 HUI Yan-Bo, FEN Lan-Fang, LU Bing-Heng. Structural Recognition Based on Object's Contour Forest. Xi'an: Technical Paper-Set of New Products' Rapid Development Technique in 21 Century, 2000. 237—242 (in Chinese)
(惠延波, 冯兰芳, 卢秉恒. 基于物体轮廓森林的结构识别, 西安: 21世纪新产品快速开发技术论文集, 2000. 237—242)
- 5 PAN Yun-He. Computer Graphics—Principle Method Application. Beijing: Higher Education Press, 2001. 18—25 (in Chinese)
(潘云鹤. 计算机图形学——原理、方法及应用. 北京: 高等教育出版社, 2001. 18—25)
- 6 FEN Yu-Qiang. Technical Research of Reconstruction of Solid-Model Based on ICT Images. Beijing: Doctor Paper of Beijing Institute of Technology, 2003. 33—42 (in Chinese)
(冯裕强. 基于 ICT 图像实体模型重构技术研究. 北京: 北京理工大学博士论文, 2003. 33—42)
- 7 HUI Yan-Bo. Technical Research of Reverse Reconstruction of CAD model Based on Slice Measement. Xi'an: Doctor Paper of Xi'an Jiaotong University, 1997. 86—89 (in Chinese)
(惠延波. 基于断层测量的 CAD 几何模型反求技术研究. 西安: 西安交通大学博士论文, 1997. 86—89)
- 8 Bunke H, Buhler U. Pattern Recognition, 1993, **26**(12): 1797—1812
- 9 Maes M. Pattern Recognition, 1991, **24**(3): 433—440
- 10 WANG Yan-Fang, QUE Jie-Ming, LIU Li et al. CT Theory and Applications, 2004, **13**(3): 39—42 (in Chinese)
(王燕芳, 阙介民, 刘力等. CT 理论与应用研究, 2004, **13**(3): 39—42)
- 11 LI Qiang, YANG Tao. Opto-Electronic Engineering, 2000, **27**(2): 28—30 (in Chinese)
(李强, 杨涛. 光电工程, 2000, **27**(2): 28—30)
- 12 Milan Sonka. Image Process, Analysis and Machine Vision. The Second Version. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003. 375 (in Chinese)
(Milan Sonka 等著. 图像处理、分析与机器视觉. 第二版. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 375)

Principle and Realization of Segmenting Contour Series Algorithm in Reverse Engineering Based on X-Ray Computerized Tomography*

WANG Yan-Fang^{1;1)} LIU Li¹ SHAN Bao-Ci² YAN Yong-Lian¹ TANG Xiao-Wei²

1 (R&D Center, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (Key Laboratory of Nuclear Analytical Techniques, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new algorithm of segmenting contour series of images is presented, which can achieve three dimension reconstruction with parametric recognition in Reverse Engineering based on X-ray CT. First, in order to get the nested relationship between contours, a method of a certain angle ray is used. Second, for realizing the contour location in one slice, another approach is presented to generate the contour tree by scanning the relevant vector only once. Last, a judge algorithm is put forward to accomplish the contour match between slices by adopting the qualitative and quantitative properties. The example shows that this algorithm can segment contour series of CT parts rapidly and precisely.

Key words X-ray CT, reverse engineering, contour series segment

Received 10 March 2006

* Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX1-SW-08)

1) E-mail: wangyf@mail.ihep.ac.cn