

## 第二十章 曲面重建与简化

曲面重建与简化是 CAD/CAM 等高新技术在高度发展过程中向曲面建模研究提出的新课题。

曲面重建要为己存在的曲面建立模型。它有两方面的含义。第一意味着已有的曲面是曲面重建的根据，可以根据需要在该曲面上采集各种数据；第二意味着已有的曲面是衡量重建所得的曲面模型质量好坏的标准，要求建立的模型能忠实地恢复已有曲面的原状。这两点是曲面重建与自由曲面表示的区别。

曲面简化是从三维重建所得到的离散曲面或造型软件所输出的三角网格中，在保证必要精度的前提下去除冗余信息，以利于图形显示的实时性，数据存储的经济性和数据传输的快速性。

曲面重建与简化的技术在机械零部件的仿制、修复与医学图象三维重建等方面发挥了重大作用。人们已成功地重建了人脸，兔头等复杂表面。

本章第 1—3 节内容取材于[YXN, 98]；第 4 节内容取材于[CLJ, 96]，[CLJ, JJR, WGZ, 97]，[JJR, CLJ, 98]；第 5 节内容取材于[YRC, WGZ, ZM, CK, HYJ, CYY, 91]；第 6 节内容取材于[ZM, HYJ, WGZ, SJH, CLJ, LYB, ZXM, ZX, 97]；第 7 节内容取材于[HLL, CLJ, CQB, ZM, ZCL, WGZ, TRF, 96]。

### 20.1 曲面重建与简化的基本概念

描述物体表面形状的数学表达式称为物体的几何模型，也称为曲面的数学模型。曲面的数学模型非常重要，它是对物体进行分析、计算和绘制的根据，是研究曲面性质的工具。

曲面是具有某种性质的点的集合。从理论上讲，每张曲面都有它自己的数学模型。但是曲面的数学模型的存在是一回事，人们对它的掌握是另一回事。有很多复杂的曲面，其模型并未为人们所掌握，例如人的头颅、动物骨头、雕塑、工艺品等外形和野外地形等等；也有很多复杂的曲面虽有数学模型，但是未掌握在需要者手里，例如复杂叶片、复杂机械零件和某些出土文物器皿的外表面等等。为了利用计算机对这类物体和其外表曲面进行分析、处理，首要的任务是为其建立数学模型。对这种数学模型没有被人们掌握的曲面，或数学模型虽有但没有掌握在需要者手里的曲面重新建立数学模型的过程称为曲面重建（Surface reconstruction）。

曲面重建是根据已有曲面去构造反映其形状的数学模型，正好与根据数学模型生成符合其要求的曲面制造的过程相反。所以工程上又称曲面重建为逆向工程（Reverse engineering）。

需要重建的曲面，其形状都很复杂。曲面重建工作需要采集大量的数据并进行大量的计算，以前只能纸上谈兵。只有在近十年来出现了大容量、高速度的计算机和各种先进的采样设备后，才为开展曲面重建工作提供了必要的工具，使得进行曲面重建成为可能。

曲面重建的基本要求是准确易行。准确：要求建立起来的数学模型比较准确地反映原来曲面的形状，或者说较好地逼近原来的曲面；易行：要求对所建立的数学模型易于进行各种操作，或者说较方便地适用于计算机进行曲面的存储、分析、计算和绘制等。

实现以上基本要求的主要方法是分而治之，化繁为简。分而治之是指把复杂曲面分割成一块块小曲面片；化繁为简是指把每块小曲面片的形状都用简化的方法来表示。其中代表性的做法有以下五种。

分片线形方法。Hoppe<sup>[1]</sup>于 1992 年提出，在曲面上采集大量型值点的位置信息以后，先构造拟合采样点的分片隐式曲面，再用三角片逼近隐式曲面。最终以三角片曲面逼近需重建的曲面。

细分曲面方法。Hoppe<sup>[2]</sup>于 1994 年提出，通过反求控制顶点的方法，为需要重建的曲面建立控制网格，然后运用一系列的细分算子，对控制网格进行细分，生成细分曲面，来逼近需要重建的曲面。

隐式曲面方法。Muraki<sup>[3]</sup>在 1991 年进行的人头曲面重建中，借助于势函数的概念，用分片隐式曲面作为曲面重建的工具。Bajaj<sup>[4,5]</sup>等在 1992 年给出了插值给定网格的分片代数曲面片的构造方法；又于 1996 年将分片代数曲面用于曲面重建。

参数曲面方法。Eck<sup>[6]</sup>等于 1996 年提出用 B 样条曲面对任意给定的拓扑网格进行重建的方法。Halstead<sup>[7]</sup>等在同年提出了利用 B 样条曲面构造高精度地逼近需要重建的曲面法向的方

法。虽然这种方法还不能重建有尖点和棱角的曲面，但是它以 B 样条为工具，就为包括 B ézier 曲面在内的各种参数曲面参与曲面重建的工作开辟了道路。

变形模型方法。Miller<sup>[8]</sup>等在 1991 年提出一种几何变形模型进行闭曲面重建。即先将一种小模型放入需要重建的闭曲面的内部，然后让其膨胀变形，同时以要重建的曲面上的采样点作为对膨胀变形的约束条件。当几何模型的变形达到某一平衡点时，就可以得到需要的数学模型。

以上方法在曲面重建中发挥了很大作用。

曲面重建需要采集大量的数据，建成的模型一般都很复杂。如彩图 20.3.1 的人头，采集了 8102 个点的坐标数据，由分片线性方法重建而得的模型中包含有 15810 个三角形片。这样大量的数据给图形的实时显示、数据的存储与传输都带来麻烦和困难。为此，需要对重建得到的复杂的数学模型进行简化，以减少数据量，减少数据模型的复杂程度。一般称此工作为曲面简化 (Surface simplification)。其代表性方法有以下五种。

去点法。这种方法按一定的准则删除一些不必要的采样点，达到减少数据量的目的。Schoeder<sup>[9]</sup>在 1992 年提出平面准则，即在局部范围内拟合一张平面，删除到该平面的距离小于指定精度的点，并对保留的点重新三角化。类似地，Hamann<sup>[10]</sup>在 1994 年提出曲率准则，即删除曲率小于指定误差的点。

去边法。该方法按一定的准则删除由曲面重建方法建立起来的网格中的一条边，其做法是将要删除的边的两个端点合并为一个点，同时保持原来网格点之间的连接关系不变。Garland<sup>[11]</sup>在 1997 年设计了一种二次误差矩阵，用作去除网格边的准则。

优化法。Turk<sup>[12]</sup>在 1992 年提出，在由曲面重建方法建立起来的网格面上重新采样，并根据某种优化的准则，使采样点在网格面分布均匀，逼近误差小。最后对新的采样点进行三角化以形成简化的数学模型。

最大多边形法。Kalvin<sup>[13]</sup>于 1996 年提出，在由重建方法建立起来的网格面上，将在指定精度范围内可以近似地认为共面的相邻的三角形 (或多边形) 拼接起来，形成一个最大的多边形，用每个最大的多边形构成曲面的数学模型。同年，Cohen<sup>[14]</sup>又将这种平面最大的多边形推广到曲面多边形的形式。

多分辨率方法<sup>[15]</sup>。该方法也可称为多层次方法，它在逻辑上可以认为是替要重建的曲面建立了一个从简单到复杂的数学模型的序列，人们可以根据需要选用序列中的某一个元素表示的模型作为曲面的数学模型进行分析显示。模型序列中的各元素之间具有递推关系。

## 20.2 基于曲面网格的曲面重建技术

曲面重建的主要步骤可分为采样、织网和蒙面三步。

采样 (Sampling)。运用激光测距扫描等三维数据采样设备和有关手段在需要重建的曲面上采集大量的点的位置坐标信息。这些点可以密密麻麻地分布于整张曲面。

织网 (Weaving)。采样得到的点其数量虽然可以很大，但是点与点之间缺乏联系，每一个点都是作为一颗孤立的点出现的。有必要在点与点之间找出某种联系，将它们有机地组织起来。首先，可以用相邻关系作为点与点之间的联系，即任何两采样点之间的关系是或相邻或不相邻。明确地为每一个点规定与其相邻的点，两相邻的点可用线段相连。当所有相邻点之间都用线段相连之后，就织成了一张架于采样点之间的网，将采样点连成了一片，构成一个整体。数学上，称点与点之间的联系关系为拓扑关系，所以这样形成的网为拓扑网。称各采样点为网格点，各网眼为网格。拓扑网的种类可以很多，例如每个网格都是三角形的称为三角形网；每个网格都是四边形的称为四边形网；其他各类网常称为任意拓扑网。织网的中心问题是如何确定每一采样点的相邻点。建立三角形网时确定相邻点的常用方法是 Voronoi 图<sup>[16]</sup>，用它建立的拓扑网称为 Delaunary 三角网，又称为采样点的 Delaunary 三角剖分<sup>[16]</sup>。一般说来，Voronoi 图、Delaunary 三角剖分仅适用于平面点集。对曲面上的点集应用此方法时应先向平面投影，以投影的 Delaunary 三角剖分对应于曲面点集的三角剖分。对于形状复杂的曲面进行三角剖分应局部进行，即将采样点分成很多子集，使得每一个子集所在曲面片的形状都较简单，然后对每一子集内的点进行三角剖分。彩图 20.3.1 是对人头曲面上 8102 个采样点进行的三角剖分。Delaunary 三角剖分有很多优点，对它的介绍已超出本书的范围。有兴趣的读者可参阅计算几何方面的书籍与文献<sup>[16]</sup>。

蒙面 (Skinning)。拓扑网是要重建曲面的骨架，它已勾划出该曲面大致的形状。所谓蒙面，

形象地说，就是在拓扑网的基础上再蒙上一层皮，作为重建曲面的表面。这层皮就作为要重建的曲面的数学模型。而蒙面的主要方法有网格细分和分片曲面这样两种。

网格细分。运用曲面细分的方法为拓扑网加入新的点形成新的拓扑网，不断递归地进行此过程，一层层的拓扑网就形成了拓扑网的序列。在一定的条件下，拓扑网序列将收敛于一张通过采样点的插值曲面。代表性的曲面细分算法和原理见本书第十八章。

分片曲面。为拓扑网的每一个网格构造一张经过其各网格点的曲面片，让各网格上的曲面片拼接起来以形成整张曲面。曲面片的形式可以是隐式的也可以是参数形式的，对三角形网眼常运用三角域上的 **B-B** 曲面，对四边形网眼常运用张量积的 **B-B** 曲面。在拼接曲面片时，对网格点处的连续性和沿两曲面片公共边界处的连续性提出了不同的要求。例如要求前者达到  $G^1$ ，后者达到  $G^0$ 。

假设三角形网的网格点集为  $\{P_i\}_{i=1}^h$ ，三角形网格集为  $\{\Delta_l\}_{l=1}^m$ 。在这张拓扑网上构造达到上述连续性要求的曲面可按下列算法进行。

**算法 20.2.1** (在三角形拓扑网格上构造  $G^1$  连续曲面)

**Step 1.** (定法向) 在每一网格点  $P_i$  ( $1 \leq i \leq h$ ) 处，指定一个方向  $n_i$  作为将要构造的曲面的法向。 $n_i$  可以人为地确定，也可以按某种规则确定。设在三角形网格集  $\{\Delta_l\}_{l=1}^m$  中以  $P_i$  为顶点的三角形有  $n$  个，它们是  $\Delta_{i_1}, \Delta_{i_2}, \dots, \Delta_{i_n}$ 。可令

$$n_i = \omega_{i1}G_{i1} + \omega_{i2}G_{i2} + \dots + \omega_{in}G_{in}, \quad (20.2.1)$$

其中  $G_{ij}$  为三角形  $\Delta_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 的单位法向； $\omega_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 为权因子，它可以与三角形  $\Delta_{ij}$  的面积有关，其符号可用于改变  $G_{ij}$  的方向，使  $n_i$  都指向拓扑网的同一侧。

**Step 2.** (定边界) 设  $P_i, P_k$  是相邻点， $P_iP_k$  是网格上的一条边。过点  $P_i, P_k$  分别作以  $n_i, n_k$  为法向的平面  $\pi_i, \pi_k$ ；再过边  $P_iP_k$  作平行于  $n_i/\|n_i\| + n_k/\|n_k\|$  的平面  $\pi_{ik}$ 。设  $Q_{ik}$  (或  $Q_{ki}$ ) 为三张平面  $\pi_i, \pi_k$  和  $\pi_{ik}$  的交点。取点  $P_{ik}, P_{ki}$  为

$$P_{ik} = P_i + \lambda_{ik}P_kQ_{ik}, \quad P_{ki} = P_k + \lambda_{ki}P_iQ_{ki}. \quad (20.2.2)$$

其中  $Q_{ik} = Q_{ki}$ ， $\lambda_{ik}, \lambda_{ki}$  为系数，可以指定，也可以依某规则决定。

控制多边形  $P_iP_{ik}P_{ki}P_k$  决定了与平面  $\pi_i, \pi_k$  相切且在平面  $\pi_{ik}$  内的一条三次 Bézier 曲线，它可以作为欲求曲面片的定义在  $P_iP_k$  上的边界曲线。

**Step 3.** (定面片) 设三角形集  $\{\Delta_l\}_{l=1}^m$  中的三角形  $\Delta_l$  的顶点分别为  $P_i, P_k, P_j$ ，令

$$P_{i,j,k} = (P_i + P_k + P_j)/3 + \lambda_i n_i + \lambda_k n_k + \lambda_j n_j, \quad (20.2.3)$$

其中  $\lambda_i, \lambda_k, \lambda_j$  为权。这样，如图 20.2.1 所示，容易看出，定义在三角形  $\Delta_l$  上的以  $P_iP_kP_jP_{ik}P_{ki}P_{ij}P_{jk}P_{i,j,k}$  为控制网格的三次 Bézier 三角曲面在点  $P_i, P_k, P_j$  分别以  $n_i, n_k, n_j$  为法向，且以三条边  $P_iP_k, P_kP_j, P_jP_i$  上的边界曲线为边界。由此可见，按这种法则定义的两相邻三角形上的三次 Bézier 曲面在公共顶点处法向一致，达到  $G^1$  连续；同时沿两个三角形的公共边，两张曲面片的边界重合，即达到  $G^0$  连续。

在 (20.2.1) — (20.2.3) 中都有一些参数，这些参数可以通过某些优化准则来确定。

显然，可以增加三角域上 Bézier 曲面的次数来提高曲面拼接的连续阶。但随着连续阶的提高，曲面的表达式也更复杂。限于篇幅，这里不再展开。

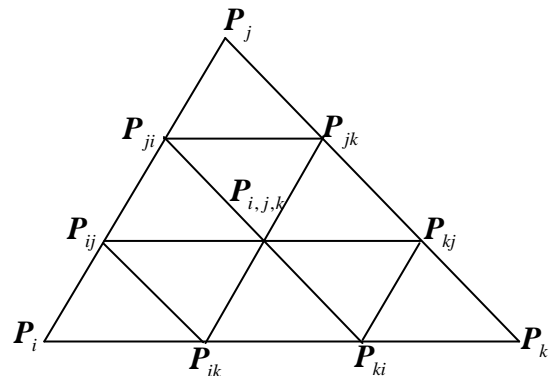


图 20.2.1 在三角形拓扑网格上构造连续曲面

## 20.3 基于球面多边形逼近的曲面简化技术

曲面简化的任务是删除过多的采样点. 在保证精度的条件下, 自然删除得越多越好.

曲面简化的中心问题是简化模板的选择. 现在常用的简化模板是平面多边形, 也就是说, 取一张平面, 将到这平面的距离不超过指定精度的采样点都认为是这平面上的点, 由这些点构成的各个网格就是在这平面上的多边形, 取这些多边形的并集作为曲面简化结果中所要的多边形予以保留, 而位于其内部的所有采样点则予以删除.

平面多边形的简化模板适用于较平坦的曲面, 而对弯曲较大的曲面, 简化效果不佳, 因为删除点的数量不大. 为此, 取球面多边形作为简化模板. 设  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  是球面  $S$  上的点列,  $\overline{P_i Q_i P_{i+1}}$  ( $i = 1, 2, \dots, n, P_{n+1} = P_1$ ) 是球面  $S$  上以  $P_i, P_{i+1}$  为端点的圆弧,  $Q_i$  是该圆弧上的一个内点. 当各段圆弧  $\overline{P_i Q_i P_{i+1}}$  首尾相连形成球面  $S$  上自身不相交的闭曲线时, 则称该闭曲线为球面多边形, 记为  $\overline{P_1 Q_1 P_2 Q_2 P_3 \dots P_n Q_n P_1}$ . 称  $P_i$  为球面多边形的顶点, 称  $\overline{P_i Q_i P_{i+1}}$  为球面多边形的边. 球面多边形的内部仍按左手法则确定, 即人在球面  $S$  的外侧沿球面多边形前进时, 左手指向的球面区域为该球面多边形的内部.

球面多边形有着和平面多边形相似的许多性质, 也有其自己的特点:

1. 边数最少的球面多边形是二边形.
2. 顶点序列  $P_1 P_2 \dots P_n P_1$  确定后, 球面多边形边界可随弧上某点  $Q_i$  的位置变化而变化.
3. 平面多边形是球面多边形的极限情况.

当球面多边形的各边都是球面上大圆的圆弧段时, 称其为正规球面多边形. 通常不要求一般的球面多边形为正规球面多边形. 这是为了两个球面多边形之间拼接的需要.

运用球面多边形作简化模板的方法是确定球面多边形并进行拼接.

确定球面多边形时, 首先将采样点划分为若干区域, 每一个区域生成一张球面, 将到球面的距离不超过指定精度的采样点认为是球面上的点, 由这些点构成的各个网格就是球面上的正规球面多边形. 取这些正规球面多边形的并集作为曲面简化结果中的正规球面多边形, 予以保留. 而作为该正规球面多边形的内点的所有采样点则予以删除.

位于不同球面上的两个正规球面多边形可以有公共顶点, 也可以有以公共顶点为两端点的交线, 但是却没有公共边, 这是因为不同球面上的两个大圆之间最多只能有两个交点. 这时有必要调整这两个球面多边形的有关边, 使它们之间有公共边. 为此, 令以公共顶点为两端点的交线作为这两个球面多边形的公共边, 并以此取代两球面多边形以该两公共顶点为端点的原来各自的边. 这样就将具有公共顶点和交线的两个正规球面多边形拼接在一起了. 彩图 20.3.1 显示的是由 8102 个顶点和 15810 个三角片构成的人头的 Shading 原型图, 彩图 20.3.2, 20.3.3 显示的是对上图作球面多边形逼近的恢复图和简化图, 逼近后顶点个数减到 651, 球面多边形个数为 343.

## 20.4 医学序列图象三维重建的基本方法

医学序列图象三维重建是曲面重建与简化的重要应用领域.

为了认识和研究人体或生物体的有关部分的内部结构和变化, 人们利用的是分解和合成的方法. 分解的过程是用一簇等间距的平行平面将人体和生物体的有关部分切成一片片很薄的切片, 即将其分解成切片的序列. 通过对切片的观察, 人们可以了解其内部结构与变化. 合成的过程是对每一切片观察的结果按顺序迭加起来, 以形成有关部分结构的原来的空间形态, 也就是从切片序列合成原物的模型.

分解过程所产生的切片可以是真切的 (如生理切片), 也可以是概念上的 (如 CT 片, MR 片). 合成过程可以由电脑进行, 如基于计算机的曲面重建; 也可以由人脑想象, 例如, 以前人们都是凭个人的经验想象原来物体的空间形状. 当然, 运用电脑合成应该是发展方向.

实质上, 分解的过程是一个数据采集的过程, 合成的过程是一个曲面重建的过程. 整个医学序列图象三维重建的主要步骤是边界提取、切片定位、表面重建.

边界提取是数据采集的重要手段. 切片的表现形式是结构很复杂的图象, 有必要把不同的部分区别开来, 把各区域的边界勾划出来, 也就是说, 要进行图象分割和边缘检测的工作. 可以用图象处理中的有关方法 (如阈值法, 虫随法等) 做这方面工作<sup>[17]</sup>. 但由于医学图象的特

殊性, 经验表明, 进行这方面工作时, 必要的人机交互还是不可少的. 这里, 图象分割和边缘检测的目的是要为切片图象的各个区域建立以多边形表示的边界线, 或者说, 从图象上采集边界线上各个顶点的坐标信息. 应该说, 制作切片为隐藏在内部的边界的采集和测量提供了方便. 这是三维重建的必要准备.

切片定位是要求将切片图象按切片原样的相对位置重迭起来使之不走样. 切片定位的方法可分硬定位与软定位两类.

硬定位是利用切片图象上标有定位的基准点, 重迭时, 只要使上下两张图象的基准点对齐重合即可. CT 片、MR 片上都有这样的标志. 生理切片图象上的基准点可以在切片制作之前运用激光对组织块打孔等物理方法产生.

软定位是在硬定位无法进行的情况下采取的方法. 其根据是生物组织的完整性和连续性, 即当切片很薄时, 相邻切片中的生物结构应基本一致, 或者说, 相邻切片的图象应基本相同. 软定位的主要方法有特征点法、区域重叠法、两步定位法、闪烁显示法等.

特征点法是在图象各区域的边界线上选定若干点, 同时又在区域内部选定若干点(如区域的形心等), 把它们作为特征点. 上下两幅图象重迭时, 取对应的特征点距离的平方和达到最小值的相对位置为这两幅图象应选定的定位位置<sup>[18]</sup>.

区域重叠法是将上下两幅图象重迭时对应的区域重叠部分的面积之和达到最大值的相对位置作为这两幅图象应选定的定位位置<sup>[19][CLJ, 96]</sup>.

两步定位法是将特征点法和区域重叠法结合起来使用的方法, 用特征点法作粗定位, 用区域重叠法作精定位, 以提高速度和定位精度<sup>[CLJ, 96]</sup>.

交替闪烁显示法是通过相邻图象交替显示进行定位的方法. 将相邻两切片图象在计算机屏幕上交替显示(频率为 2.5Hz), 其中一幅静止, 另一幅可作平移、旋转变换, 这时视觉上产生一种图象在运动的感觉, 取这种运动感觉达到最小时的两幅图象的相对位置为应选定的定位位置<sup>[20]</sup>.

其它的软定位方法不再列举.

表面重建旨在给出重建物体的表面形状和数学模型, 这里包括边界线对应、三角剖分、分支处理和曲面拟合四个问题, 其中以三角剖分为重点.

边界线对应是指确定上下两切片图象之间各个区域的边界线的对应关系. 一幅图象中不同区域的边界线可以对应于另一幅图象中的不同区域的边界线, 也可以对应于另一幅图象中同一区域的边界线. 这种对应关系的确定必要时可以借助人机交互.

三角剖分是将夹在上下两切片图象对应的边界线之间的立体表面进行三角剖分, 以三角片围成的面作该表面的近似. 显然, 在以多边形构成的边界线确定后, 这种三角剖分可以有很多. 可以用优化的方法从中选取最佳的三角剖分. 如果要围成的体积最大<sup>[21]</sup>、或围成的表面积最小<sup>[22]</sup>、或边长的最大值最小<sup>[23]</sup>等, 还可以提出其它的优化目标. 三角剖分是表面重建研究的中心问题, 它的实现可以用有向图法; 而利用神经网络算法可以提高算法速度, 利用模拟退火法可以统一处理各优化目标函数.

分支处理是表面重建的难点. 当边界线对应时发现并确定有两个或两个以上区域的边界线与同一个区域的边界线相对应时, 分支就产生了. 在三角剖分前应处理好这个问题.

曲面拟合是在三角剖分的基础上运用插值曲面的技术生成光滑的表面.

## 20.5 人体下颌下腺淋巴管的三维重建

血管的形状是人们所知道的, 而淋巴管却不是. 本三维重建的目的在于揭示部分淋巴管的形象. 彩图 20.5.1 中显示为黄色的是由切片重建的人体下颌下腺淋巴管(显示为红色的是血管, 显示为蓝色的是腺导管, 也是由切片重建的)<sup>[24,25]</sup>.

材料取自正常人(20—40岁)下颌下腺组织( $3 \times 3 \times 1.5 \text{mm}^3$ ), 作半薄连续切片(每张切片厚  $2 \mu\text{m}$ ).

切片定位方法采用硬定位和特征点的软定位方法相结合.

分支处理结合三角剖分进行.

## 20.6 人喉的计算机三维重建及动态图形模拟

人喉是发声器官, 机构复杂, 由甲状软骨、环形软骨、构状软骨和会厌软骨组成, 并由

方形膜和弹性圆锥等连接。

本三维重建的目的在于建立人喉的计算机模型，进行喉运动的动态图形模拟，以用于医学教学。彩图 20.6.1 显示的是重建的人喉三维模型<sup>[26]</sup>。

材料取自成人颈部标本和喉软骨各 5 具，作冷冻横断切片（每张切片厚 3—5mm）。

改进三角剖分为四边形剖分，按张量积形式的 B ézier 曲面进行拟合。

## 20.7 人体子宫螺旋血管的三维重建

本三维重建是为医学科研人员观察子宫内膜的螺旋血管的形状变化提供新的手段。彩图 20.7.1, 20.7.2, 20.7.3 显示的是它的原始切片、边界提取和计算机三维重建结果。

材料取自妇女（24—35 岁）子宫前、后壁内膜 2—3 条，作连续切片（每张切片厚 4 $\mu$ m）。

切片定位，是根据血管为球包络的特点，运用可变半径滚球可顺利通过各切片对应区域的软定位方法<sup>[CLJ, 96]</sup>。

### 主要文献

[YXN, 98] 杨勋年，基于几何逼近的曲线曲面造型技术研究，浙江大学博士学位论文，1998 年 5 月，杭州

[CLJ, 96] 陈凌钧，医学图象三维重建的研究，浙江大学博士学位论文，1996 年 4 月，杭州

[CLJ, JJR, WGZ, 97] 陈凌钧，金建荣，汪国昭，三维重建的统一方法——模拟退火法，计算机学报，1997, 20(12): 1133-1136

[JJR, CLJ, 98] 金建荣，陈凌钧，三维重建的神经网络算法，浙江大学学报（自然科学版），1998, 32(1): 15-21

[YRC, WGZ, ZM, CK, HYJ, CYY, 91] 应荣超，汪国昭，章明，陈凯，韩永坚，蔡亦渔，人下颌下腺淋巴管、血管和腺导管的计算机三维重建技术，解剖学学报，1991, 22(4): 342-346

[ZM, HYJ, WGZ, SJH, CLJ, LYB, ZXM, ZX, 97] 章明，韩永坚，汪国昭，沈建华，陈凌钧，梁友宝，曾新民，张璇，人喉的计算机三维重建及显示，解剖学杂志，1997, 20(3): 205-207

[HLL, CLJ, CQB, ZM, ZCL, WGZ, TRF, 96] 黄丽丽，陈凌钧，陈湫波，章明，赵承洛，汪国昭，童若峰，放置宫内节育器后子宫内膜螺旋动脉的三维空间状态，中华妇产科杂志，1996, 31(9): 523-525

### 参考文献

- 1 Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., Stuetzle, W., Surface reconstruction from unorganized points, Proceedings of SIGGRAPH'92, Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78
- 2 Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Halstead, M., Jin, H., McDonald, J., Schweitzer, J., Stuetzle, W., Piecewise smooth surface reconstruction, Proceedings of SIGGRAPH'94, 295-302
- 3 Muraki, S., Volumetric shape description of range data using "Blobby model", Proceeding of SIGGRAPH'91, Computer Graphics, 1991, 25(4): 227-235
- 4 Bajaj, C., Ihm, I.,  $C^1$  smoothing of polyhedral with implicit algebraic splines, Proceeding of SIGGRAPH'92, Computer Graphics, 1992, 26(2): 79-88
- 5 Bajaj, C., Ihm, I., Algebraic surface design with Hermite interpolation, ACM Transactions on Graphics, 1992, 11(1): 61-91
- 6 Eck, M., Hoppe, H., Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type, Proceedings of SIGGRAPH'96, 325-334
- 7 Halstead, M., Barsky, B., Klein, S., Mandell, R., Reconstructing curved surfaces from specular reflection patterns using spline surface fitting of normals, Proceedings of SIGGRAPH'96, 335-342
- 8 Miller, J.V., Breen, D.E., Lorensen, W.E., O'Bara, R.M., Wozny, M.J., Geometrically deformed models: A method for extracting closed geometric models from volume data, Proceedings of SIGGRAPH'91, Computer Graphics, 1991, 25(4): 217-226
- 9 Schroeder, W., Zarge, J., Lorensen, W., Decimation of triangle meshes, Proceedings of SIGGRAPH'92, Computer Graphics, 1992, 26(2): 65-70
- 10 Hamann, B., Curvature approximation for 3D manifolds in 4D space, Computer Aided Geometric Design, 1994, 11(6): 621-632
- 11 Garland, M., Heckbert, P., Surface simplification using quadric error metrics, Proceedings of SIGGRAPH'97, 209-216
- 12 Turk, G., Re-tiling polygonal surfaces, Proceedings of SIGGRAPH'92, Computer Graphics, 1992, 26(2): 55-64
- 13 Kalvin, A., Taylor, R., Superfaces: Polygonal mesh simplification with bounded error, IEEE Computer graphics and application, 1996, 16(3): 64-77
- 14 Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F., Wright, W., Simplification envelopes, Proceedings of SIGGRAPH'96, 119-128

- 
- 15 Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M., Stuetzle, W., Multiresolution analysis of arbitrary meshes, Proceedings of SIGGRAPH'95, 173-182
  - 16 Preparata, F.P., Shamos, M.I., *Computational Geometry—An Introduction*, Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 1985
  - 17 帕夫利迪斯 T., 计算机图形显示和图象处理的算法, 吴成柯译, 科学出版社, 1988, 北京
  - 18 Merickel, M., 3D reconstruction: the registration problem, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, 42(2): 206-219
  - 19 Giersten, C., Halvorsen, A., Flood, P.R., Graph-directed modeling from serial section, *The Visual Computer*, 1991, 6(5): 284-290
  - 20 Carlbom, I., Terzopoulos, D., Harris, K., Computer-assisted registration, segmentation, and 3D reconstruction from images of neuronal tissue sections, *IEEE Transactions on Medi Imaging*, 1994, 13(2): 351-362
  - 21 Keppel, E., Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines, *IBM Journal of Research and Development*, 1975, 19(1): 2-11
  - 22 Fuchs, H., Kedem, Z.M., Uselton, S.P., Optimal surface reconstruction from planar contours, *Communication of the ACM*, 1977, 20(10): 693-702
  - 23 Christiansen, H.N., Sederberg, T.W., Conversion of complex contour line definition into polygonal element mosaics, Proceedings of SIGGRAPH'78, *Computer Graphics*, 1978, 12: 187-192
  - 24 陈凯, 序列显微图象的三维重建显示, 浙江大学硕士学位论文, 1990, 杭州
  - 25 蔡亦渔, 显微图象的三维调和构筑, 浙江大学硕士学位论文, 1990, 杭州
  - 26 沈建华, 人喉的计算机三维重建及其在医学教育中的应用, 浙江大学硕士学位论文, 1992, 杭州