

血管的三维重建

摘要

本文以血管的三维重建为研究对象,对 100 张平行切片图像进行分析,利用这些宽、高均为 512 象素的切片,计算管道的半径和确定中轴线方程,并在此基础上画出重建后的血管三维图像,主要内容如下:

对于问题一,计算管道的半径,由于血管表面是由球心沿着某一曲线(称为中轴线)的球滚动包络而成,可以得出结论:切片中包含的最大圆的半径即血管半径,所以问题转化为求每一切片上的最大内切圆的半径。为了便于计算,运用 *Matlab imread* 函数,将 *BMP* 格式文件转化为 0-1 矩阵,然后运用 *edge*、*bwmorph* 函数确定轮廓和骨架的位置,并求解骨架上每一点到边缘的最短距离。这些最短距离中的最大值即为最大内切圆半径也就是血管半径。最后对所有的半径取平均值,得出结果:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{k=1}^{100} R_{(k)}}{100} = 29.41666$$

对于问题二,根据问题一中求出的 100 个圆心坐标及半径求解中轴线方程,运用 *Matlab* 软件对圆心所形成的曲线进行 n 阶多项式拟合。为使中轴线较为光滑,在 *Matlab* 拟合工具箱多次试验后,取最高阶次 $n=7$ 。由于 z 轴值是逐层单调递增的,为简化方程的计算,取 t 为参变量,分别对其投影在 YZ 、 ZX 平面上进行多项式拟合,最后得到中轴线在平面投影上拟合的曲线方程如下:

$$f = \begin{cases} y(t) = -3.23 \times 10^{-10} t^7 + 1.169 \times 10^{-7} t^6 - 1.628 \times 10^{-5} t^5 + 0.00108 t^4 - 0.03526 t^3 \\ \quad + 0.5706 t^2 - 3.105 t + 5.243 \\ x(t) = 3.061 \times 10^{-10} t^7 - 9.623 \times 10^{-8} t^6 + 1.36 \times 10^{-5} t^5 - 0.6406 \times 10^{-3} t^4 + 0.01912 t^3 \\ \quad - 0.298 t^2 + 1.89 t - 1.633 \\ z(t) = t \end{cases}$$

最后根据方程画出中轴线图形, YZ 、 YX 、 ZX 平面的投影在拟合工具箱中可以直接得到。

对于问题三,根据问题一、二求出的中轴线的参数方程和 100 张切片的最大内切圆的半径,运用 *Matlab* 软件画出血管的三维立体图。

关键词: 血管半径

中轴线

Matlab 图像处理

三维重建

毕业设计（论文）原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重承诺：所呈交的毕业设计（论文），是我个人在指导教师的指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除文中特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或组织已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得_____及其它教育机构的学位或学历而使用过的材料。对本研究提供过帮助和做出过贡献的个人或集体，均已在文中作了明确的说明并表示了谢意。

作者 签 名：_____ 日 期：_____

指导教师签名：_____ 日 期：_____

使用授权说明

本人完全了解_____大学关于收集、保存、使用毕业设计（论文）的规定，即：按照学校要求提交毕业设计（论文）的印刷本和电子版本；学校有权保存毕业设计（论文）的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；在不以赢利为目的前提下，学校可以公布论文的部分或全部内容。

作者签名：_____ 日 期：_____

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权_____大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

涉密论文按学校规定处理。

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

指导教师评阅书

指导教师评价：

一、撰写（设计）过程

1、学生在论文（设计）过程中的治学态度、工作精神

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

2、学生掌握专业知识、技能的扎实程度

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

3、学生综合运用所学知识和专业技能分析和解决问题的能力

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

4、研究方法的科学性；技术线路的可行性；设计方案的合理性

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

5、完成毕业论文（设计）期间的出勤情况

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

二、论文（设计）质量

1、论文（设计）的整体结构是否符合撰写规范？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

2、是否完成指定的论文（设计）任务（包括装订及附件）？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

三、论文（设计）水平

1、论文（设计）的理论意义或对解决实际问题的指导意义

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

2、论文的观念是否有新意？设计是否有创意？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

3、论文（设计说明书）所体现的整体水平

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

建议成绩：☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

（在所选等级前的□内画“√”）

指导教师：

（签名）

单位：

（盖章）

年 月 日

评阅教师评阅书

评阅教师评价：

一、论文（设计）质量

1、论文（设计）的整体结构是否符合撰写规范？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

2、是否完成指定的论文（设计）任务（包括装订及附件）？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

二、论文（设计）水平

1、论文（设计）的理论意义或对解决实际问题的指导意义

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

2、论文的观念是否有新意？设计是否有创意？

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

3、论文（设计说明书）所体现的整体水平

☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

建议成绩：☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 及格 ☐ 不及格

（在所选等级前的☐内画“√”）

评阅教师：

（签名）

单位：

（盖章）

年 月 日

一、问题重述

1.1 问题背景与条件

生物体的外部结构具有繁杂多样性，可以通过肉眼观察，但若想了解其内部错综复杂的结构，就需要借助一定的辅助工具，人们常利用的是分解和合成的方法。其中分解就是将生物体做成切片，而切片就是用一组等间距的平行平面将生物体中需要研究的部位切成簿薄的一片，每一片就是生物体某一横断面的图像，当人们需要了解生物体信息时，再采用合成的方法，利用切片信息重建原物体的三维形态。这种方法在医学和其他领域有着广泛的应用，如要将人体的组织、器官、血管等的三维信息，包含内部错综复杂的结构，完整地存储在计算机中，以现在的技术也是有一定难度的，但若改用存储切片信息，使用时重建再现的方法，则是利用现有技术可以解决的。本文为就在此背景下提出下面的问题。

1.2 需要解决的问题

断面可用于了解生物组织、器官等的形态。例如，将样本染色后切成厚约 $1\mu m$ 的切片，在显微镜下观察该横断面的组织形态结构。如果用切片机连续不断地将样本切成数十、成百的平行切片，可依次逐片观察。根据拍照并采样得到的平行切片数字图象，运用计算机可重建组织、器官等准确的三维形态。

假设某些血管可视为一类特殊的管道，该管道的表面是由球心沿着某一曲线（称为中轴线）的球滚动包络而成。例如圆柱就是这样一种管道，其中轴线为直线，由半径固定的球滚动包络形成。

现有某管道的相继 100 张平行切片图象，记录了管道与切片的交。图象文件名依次为 $0.bmp$ 、 $1.bmp$ 、 $\dots$ 、 $99.bmp$ ，格式均为 BMP ，宽、高均为 512 个像素（ $pixel$ ）。为简化起见，假设：管道中轴线与每张切片有且只有一个交点；球半径固定；切片间距以及图象像素的尺寸均为 1。

取坐标系的 z 轴垂直于切片，第 1 张切片为平面 $z=0$ ，第 100 张切片为平面 $z=99$ 。 $Z=z$ 切片图象中像素的坐标依它们在文件中出现的前后次序为：

$$\begin{aligned} &(-256,-256,z), (-256,-255,z), \dots, (-256,255,z), \\ &(-255,-256,z), (-255,-255,z), \dots, (-255,255,z), \\ &\quad \dots\dots \\ &(255,-256,z), (255,-255,z), \dots, (255,255,z), \end{aligned}$$

问题一：计算管道的半径。

问题二：确定管道的中轴线方程及画出中轴线在 XY 、 YZ 、 ZX 平面的投影图及三维立体图形。

问题三：根据中轴线及半径对血管进行三维重建。

二、模型假设

结合本题的实际，为了确保模型求解的准确性和合理性，我们排除了一些因素的干扰，提出以下几点假设：

- 1、所有数据均是准确的，根据像素能够近似地描绘出图形；
- 2、切片的厚度为一个像素；
- 3、将血管看作一类特殊的管道，不考虑血管的弹性，即血管的半径为一常数；
- 4、对切片拍照的过程中不存在误差，数据误差仅与切片数字图象的分辨率有关；
- 5、中轴线上任意两点处的法截面圆不相交。

三、符号说明

为了便于问题的求解，我们给出以下符号说明：

符号	说明
d_{ijk}	第 k 副图骨架点 i 到边缘点 j 的距离
R_k	第 k 副图的最大内切圆半径
$\overline{R}$	半径的平均值
C_i	第 i 张图片的重合度
S	原切片图片的上内点及边界点的集合
T	重新切片得到的内点及边界点的集合

四、问题分析

血管可视为一类特殊的管道，该管道的表面是由球心沿着某一曲线（称为中轴线）的球滚动包络而成。本文的主要工作是求解管道的半径及中轴线方程，绘制中轴线在 XY 、 YZ 、 ZX 平面的投影图并重建血管的三维图像。

对于问题一，要求解管道的半径。根据图片分析，除去图片“弯月”的两端之外，这一图形的宽度是保持不变的，这一宽度就是我们所要求的球的直径 $2R$ 。由于管道的表面是由球心沿着某一曲线（称为中轴线）的球滚动包络而成的，所以可以将问题转化为求球体的半径，也就是过球心的被截圆的半径。题目中只给出了100张管道的切面图，这些二维图形是由无穷多个球被截的圆叠加而成的，基于：1) 球的任意截面都是圆；2) 经过球心的球截面是所有截圆当中半径最大的圆；3) 管道中轴线与每张切片有且只有一个交点，即为球心。所以每张切片的最大内切圆的圆心位于血管的中轴线上，该圆的半径等于血管半径，即问题就可以转化为求切片上最大内切圆的半径。首先，运用 *Matlab* 读取图片，将 *BMP* 格式文件转化为0-1矩阵，通过 *edge*、*bwmorph* 函数确定轮廓和骨架的位置，通过循环不断搜索计算每张图中骨架上每一点到轮廓上每一点的最短距离，然后取最短距离中的最大值，即为最大内切圆的半径，最后对求出的100个最大内切圆半径取算数平均值减小误差，最后的值即为管道半径。

对于问题二，求中轴线，根据问题一中算出的100个最大内切圆半径和圆心坐标，运用 *Matlab* 软件对所有圆心坐标所形成的曲线进行拟合，根据坐标所画出的散点图规律，采用 n 阶多项式拟合方式。根据拟合出曲线的光滑度确定最高阶次 n ，由于一个 z 只对应于一个 x 和一个 y ，故可分别对其投影在 YZ 、 ZX 平面上进行多项式拟合，求出方程 $y = f_1(z)$ 和 $y = x = f_2(z)$ ，则中轴线的空间方程即为上两式的联立便得到了血管管道的中轴线参数函数。根据拟合出的方程，画出中轴线在 YZ 、 YX 、 ZX 平面的投影，拟合曲线及立体图形。

对于问题三，基于问题一、二的求解结果，根据中轴线的参数方程及滚动球的半径，我们运用 *Matlab* 中的绘图工具，结合每张切片图的球心坐标与球的半径，得到血管的还原三维立体图形。

五、模型的建立与求解

经过以上的分析和准备，我们将逐步建立以下数学模型，进一步阐述模型的实际建立过程。

5.1 血管半径的计算

算法步骤：

step1：导入数据，运用 *Matlab* 读取函数，转换存储方式；

step2：运用 *edge*、*bwmorph* 函数确定轮廓和骨架的位置；

step3：寻找最大内切圆；

step4：求解100张图片的最大内切圆；

step5：取100个半径的算术平均值。

具体过程：

由于血管是由半径固定的球滚动包络形成，所以过球心的截圆的半径也就是血管的半径，题中给出了血管被切片机平行切割后的 100 张切片图像，这 100 张切片图像是由无穷多个球被截的圆叠加而成的，又由于管道中轴线与每张切片有且只有一个交点，即球心。所以在每张切片上总存在着以交点为圆心的圆，此时半径最大，这最大半径同时也是管道的半径。求出最大半径后，运用循环算法，得出这 100 张切片的最大半径，最后取算术平均值得出管道的半径。

（1）导入数据，转换存储方式

本题中给了100张图片，虽然易于直接观察，但不利于以数学思维建模，为了减少计算量，并保证数据的准确性，首先对 *BMP* 格式的图像进行预处理，由于 *BMP* 格式文件在计算机中是以二进制数进行存储的，图像保存在一个二维的有0或1组成的矩阵中。所以，所以将原来 512×512 单色 *BMP* 图像格式运用 *Matlab* 读取函数转化为二维的0-1矩阵，其中1代表黑色像素点，0代表白色像素点。对于一个 512×512 像素的图像，每一个像素都有自己的一个确定的坐标。由此，可以找出这100张图片的像素矩阵。

（2）确定轮廓线^[1]及骨架^[2]的位置

为了在减少计算量的基础上，却又反应图像的基本性质，我们确定切片的轮廓线及骨架的位置，其中轮廓是指在亮度不同的区域之间有一个明显的变化，即明度级差突然变化而形成的；而图像的骨架即图像中央的骨骼部分，是描述图像几何及拓扑性质的重要特征之一。具体位置见下图1、2：

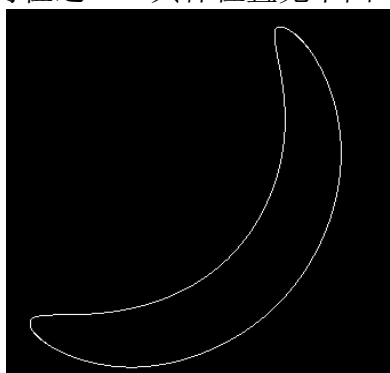


图1 轮廓

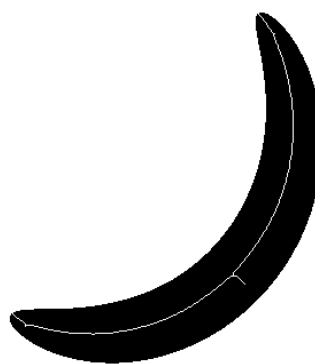


图2 骨架

接下来以其中一张图片为例进行详细研究，运用 *edge*、*bwmorph* 函数确定轮廓和骨架的位置，并用二维矩阵来存储轮廓线及骨架，这样可以减少冗余的信息量而又突出形状特点，具体方法如下：

在确定骨架时，逐次去掉切片图像轮廓线上的点，同时要保证区域的连通性，余下的部分就是物体的骨架。

运用边缘检测大幅度地减少了数据量，并且剔除了可以认为不相关的信息，保留了图像重要的结构属性。在二维的0-1矩阵中，“0”表示切面上的点，“1”表示切面外的点，对于某一个具体的像素，在其上下左右存在着四个像素，被称为该像素的四邻域，当这一具体像素为“0”时，周围像素中有一个值为“1”，则该点为边界点，用此方法可以对边缘进行检测，确定边缘坐标。

（3）寻找最大内切圆

求出骨架到血管轮廓边界上每一点的距离，则其中的最小距离为即是以该点为圆心的内切圆。找到所有内点的半径后，其中半径最大的内点即为所要找的球心，对应的内切圆即为最大内切圆。若一张切片出现多个圆心时，鉴于所给切片是 *BMP* 格式的图像，是对原血管的切片的连续图形离散化而得到的近似图形，则实际计算时有可能出现在一个切片中同时找到多个最大内切圆，即内切圆不惟一。我们选取与前一张所得圆心距离最近的圆心为当前切片最大内切圆的圆心。

在矩阵内找到轮廓的内切圆记下圆心坐标与半径并储存。骨架看作点的集合，计算骨架上每一点 $A(x,y)$ 到轮廓 $B(p,q)$ 的距离：

$$d_{ijk} = \sqrt{(x-p)^2 + (y-q)^2}$$

取 d_{ijk} 最小值，即该点垂直于外边缘，也就是存在着以该点为圆心的圆相切于外边缘。

最后取最小距离的最大值，即是最大内切圆的半径：

$$R_k = \max_i \min_j \{d_{ij}\}$$

(4) 100张图片的半径

完成骨架上任一点对轮廓线像素点的遍历求距离，并比较记录的所有最小距离值，最小距离的最大值即为该切片图像的最大内切圆的半径，通过循环100次可以得到这100张图片的最大内切圆的半径。运用 *Matlab* 编程（见附录一）得出前40个结果（余下结果见附录二）见下表1：

表 1 最大内切圆半径及圆心坐标

		最大内切圆圆心坐标					最大内切圆圆心坐标		
切片序号	最大内切圆半径 ($R/\mu m$)	横坐标 ($X/\mu m$)	纵坐标 ($Y/\mu m$)	竖坐标 ($Z/\mu m$)	切片序号	最大内切圆半径 ($R/\mu m$)	横坐标 ($X/\mu m$)	纵坐标 ($Y/\mu m$)	竖坐标 ($Z/\mu m$)
0	29.06	-160	1	1	20	29.01	-160	19	21
1	28.28	-160	0	2	21	29.01	-160	20	22
2	29.01	-160	2	3	22	29.01	-160	21	23
3	29.06	-160	2	4	23	29.01	-160	22	24
4	29.06	-160	2	5	24	29.06	-160	21	25
5	29.06	-160	2	6	25	29.06	-160	21	26
6	29.00	-160	1	7	26	29.06	-160	21	27
7	29.01	-160	4	8	27	29.15	-159	30	28
8	29.00	-160	1	9	28	29.27	-159	30	29
9	28.86	-160	1	10	39	29.27	-159	29	30
10	28.86	-160	7	11	30	29.42	-158	35	31
11	28.86	-160	8	12	31	29.61	-157	40	32
12	28.86	-160	9	13	32	29.61	-157	40	33
13	29.01	-160	10	14	33	29.61	-157	40	34
14	29.01	-160	12	15	34	29.61	-156	44	35

15	29.01	-160	13	16	35	29.73	-153	55	36
16	29.01	-160	14	17	36	29.73	-153	55	37
17	29.01	-160	16	18	37	29.73	-153	55	38
18	29.01	-160	17	19	38	29.73	-152	58	39
19	29.01	-160	18	20	39	29.61	-152	58	40

(5) 为减小误差, 取平均值

从表 1 可以看出, 这 100 张图片的最大内切圆半径相近, 但也存在着差异, 为了使结果更准确, 取它们的算术平均值这样可以减少在计算中的误差, 计算公式如下:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{k=1}^{100} R_{(k)}}{100} = 29.41666$$

5.2 中轴线方程

根据表一中求出的 100 个圆心坐标, 运用 *Matlab* 拟合工具箱对圆心所形成的曲线进行拟合, 求出中轴线拟合的曲线方程, 其中有 4 种拟合方式: 线性拟合、抛物线拟合、 n 阶多项式拟合和 e^{ax+b} 拟合。前两种拟合方式显然与现实相差太远, 而第四种拟合又可以用第 3 种来逼近, 所以选择第 3 种方式。对于 n 阶多项式拟合中的最高阶次的取值遵循两个原则:

- 1) 偏差平方和尽量小, 这样可以提高数据的拟合度;
- 2) 拟合最高次数不能太高, 最好控制在 9 以内, 当次数过高时, 会增大误差, 自变量若有稍微的变动时, 应变量的变化会非常大。

根据这两个原则确定 $y(t)$ 、 $x(t)$ 方程的最高阶次 $n=7$, 此时拟合出的中轴线较为光滑。以题中给的坐标系为模型, 根据空间中轴线是由点组成且 z 轴值是逐层单调递增, 为简化方程的计算, 取 t 为参变量, 分别对其投影在 YZ 、 ZX 平面上进行多项式拟合, 求出 $y = f_1(z)$ 和 $y = x = f_2(z)$ 最后运用 *Matlab* 拟合工具箱得到中轴线在平面投影上拟合的曲线方程如下:

$$f = \begin{cases} y(t) = -3.23 \times 10^{-10} t^7 + 1.169 \times 10^{-7} t^6 - 1.628 \times 10^{-5} t^5 + 0.00108 t^4 - 0.03526 t^3 \\ \quad + 0.5706 t^2 - 3.105 t + 5.243 \\ x(t) = 3.061 \times 10^{-10} t^7 - 9.623 \times 10^{-8} t^6 + 1.36 \times 10^{-5} t^5 - 0.6406 \times 10^{-3} t^4 + 0.01912 t^3 \\ \quad - 0.298 t^2 + 1.89 t - 1.63.3 \\ z(t) = t, \quad 0 \leq z \leq 99 \end{cases}$$

经检验: $y(t)$ 、 $x(t)$ 方程的拟合度 R^2 分别为: 0.9837、0.9935, 均大于 0.9, 所以拟合度较高。

由此画出中轴线在 YZ 、 YX 、 ZX 平面投影拟合曲线及立体图形, 见下图 3、4、5、6:

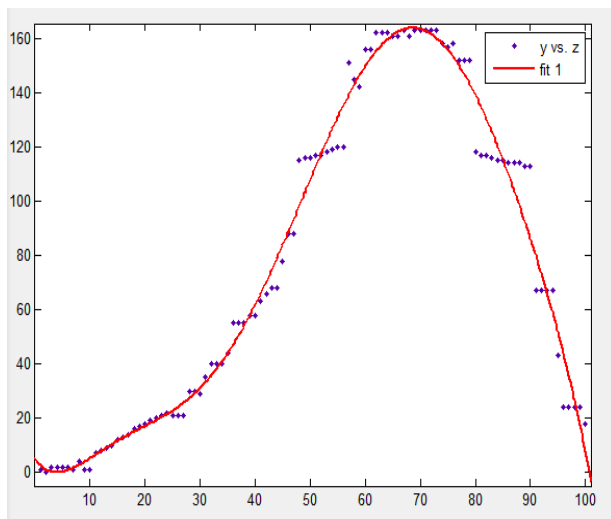


图 3 中轴线在 YZ 平面的投影拟合曲线

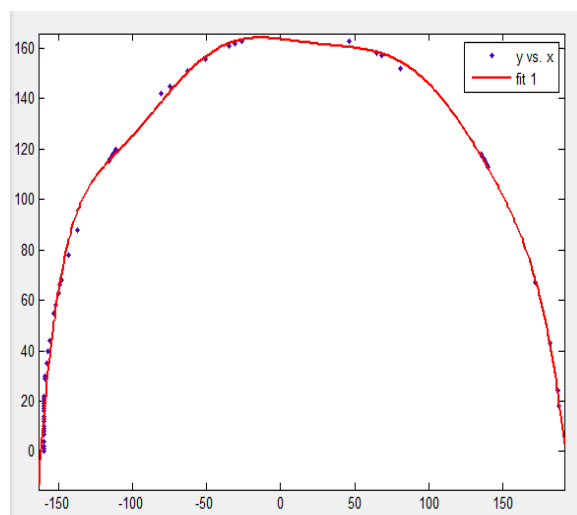


图 4 中轴线在 XY 平面的投影拟合曲线

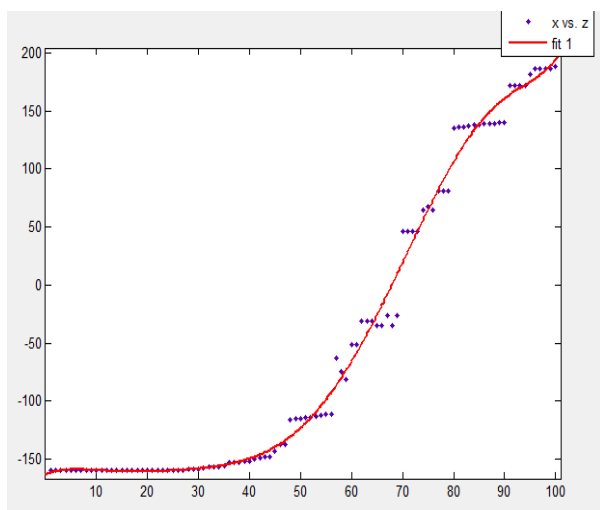


图 5 中轴线在 XZ 平面的投影拟合曲线

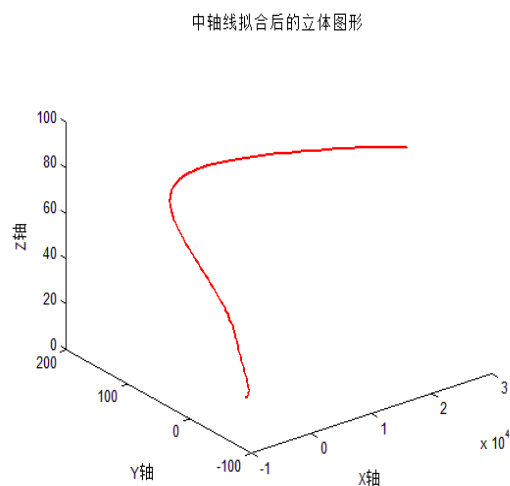


图 6 中轴线拟合的立体图形

分析图像可知：

1) 通过三张拟合图发现，得到的曲线都基本经过散点图中各三点的位置，特别在开始的区域，可以说是完全重合，从图案中发现拟合度较高。根据图 4 分析，图形是呈盘形状的，随着 X 变大，在 Y 轴变化趋势为：陡—平—陡。结合图 3 和图 5 分析随着 Z 的不断变大，图形盘旋上升的趋势为：平—陡—平。

2) 拟合的中轴线在整个 z 轴上 ($0 \leq z \leq 99$) 与血管的实际中心轴基本吻合。

3) 尽管所得的差值没有具体的几何意义，但是如果对不同层的差值进行比较，可发现中轴线的拟合在层数 $z < 30$ 的地方误差较小，随着 z 值的增大，误差变大，这在直观上是可以理解的。当 z 增大是，轴线与 XY 平面接近平行， $\frac{ds}{dz}$ 变大，切片上容纳的信息有限，产生较大误差。

5.3 重建血管的三维图像

根据中轴线的参数方程及 100 张切片的最大内切圆的半径，运用 *Matlab* 编程（见附录三）我们得到切片叠加的原图形和血管重建后的三维立体图形见下图 7、图 8：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要
下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/598027002015006062>