



交叉学科研究生高水平课程系列教材

解孝林 赵峰/丛书总主编

三维医学图像处理软件 设计与开发实战

金人超/主编

SANWEI YIXUE TUXIANG CHULI RUANJIAN SHEJI YU KAIFA SHIZHAN

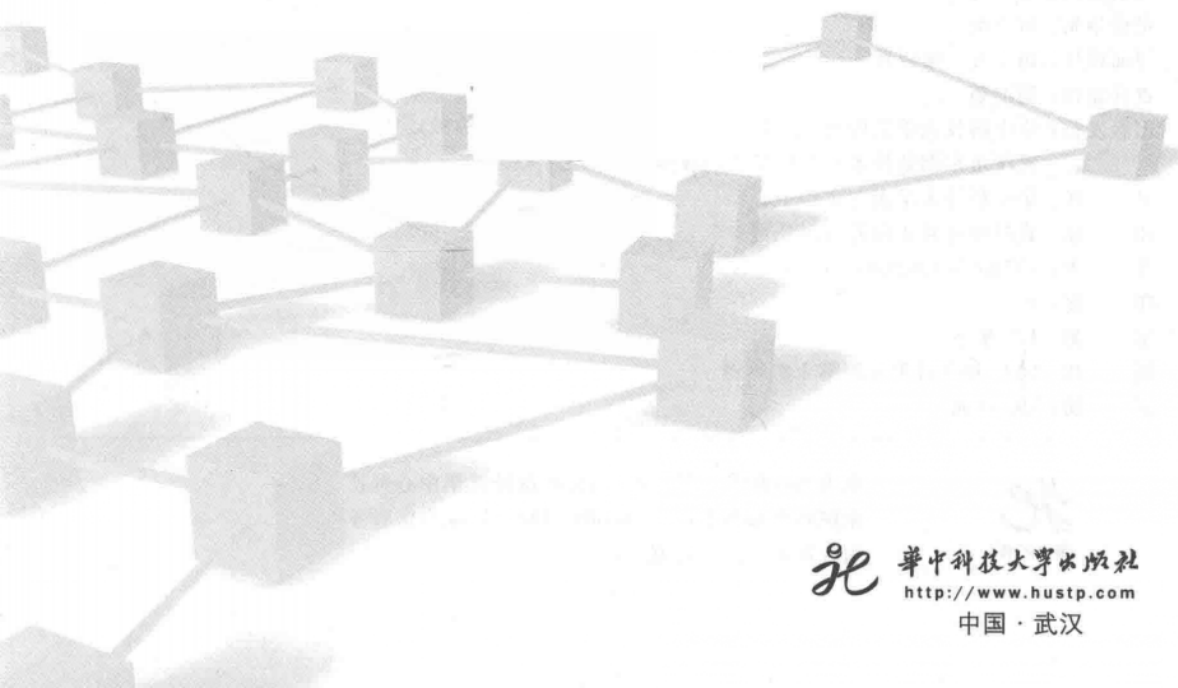


交叉学科研究生高水平课程系列教材

三维医学图像处理软件 设计与开发实战

SANWEI YIXUE TUXIANG CHULI RUANJIAN SHEJI YU KAIFA SHIZHAN

主 编 / 金人超



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书适合希望从事医学图像信息处理与分析工作的初学者,包括初次接触三维医学图像处理与分析的相关 IT 专业学生和软件开发人员(最好具有计算机软件与应用相关专业本专科学历,具有一定的编程经验)学习。

本书内容共分 4 章:第 1 章是零基础快速入门的介绍,从一个开源软件 ITK-SNAP 的介绍开始,将初学者带入三维医学图像处理与分析的大门;第 2 章介绍三维医学图像的分割算法和软件,以及将理论联系实际的三维 CT 中的肝区分割和肝段分割示例;第 3 章介绍三维医学图像配准算法和 elastix 软件;第 4 章介绍基于深度学习的三维医学图像分析,包括使用 Python、Jupyter 等的实战,将初学者带到人工智能与三维医学图像处理的最前沿领域。

本书强调帮助初学者快速获取实际操作能力,编排上图文并茂,行文上努力“稀释”枯燥的理论叙述,但又不失理论的严谨和深度。本书从感性认识到理性认识,对三维医学图像处理的相关知识进行了生动活泼而又深入浅出的讲解。

图书在版编目(CIP)数据

三维医学图像处理软件设计与开发实战/金人超主编. —武汉:华中科技大学出版社,2020.7

交叉学科研究生高水平课程系列教材

ISBN 978-7-5680-6209-1

I. ①三… II. ①金… III. ①三维-医学摄影-图形软件-软件开发-研究生-教材 IV. ①R445
②TP317.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 124163 号

三维医学图像处理软件设计与开发实战

金人超 主编

Sanwei Yixue Tuxiang Chuli Ruanjian Sheji yu Kaifa Shizhan

策划编辑:张少奇

责任编辑:邓 薇

封面设计:杨玉凡 廖亚萍

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉中科兴业印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:8

字 数:175千字

版 次:2020年7月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

交叉学科研究生高水平课程系列教材

编委会



总主编 解孝林 赵 峰

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈吉红 陈建国 金人超 刘宏芳 刘劲松

潘林强 施 静 史岸冰 王从义 王连弟

解 德 闫春泽 杨家宽 张胜民 张勇慧

秘 书 郑金焱 周 琳 张少奇

总序

Zongxu

2015年10月国务院印发《统筹推进世界一流大学和一流学科建设总体方案》，2017年1月教育部、财政部、国家发展改革委印发《统筹推进世界一流大学和一流学科建设实施办法（暂行）》，此后，坚持中国特色、世界一流，以立德树人为根本，建设世界一流大学和一流学科成为大学发展的重要途径。

当代科技的发展呈现出多学科相互交叉、相互渗透、高度综合，以及系统化、整体化的趋势，构建多学科交叉的培养环境、培养复合创新型人才已经成为研究生教育发展的共识和趋势，也是研究生培养模式改革的重要课题。华中科技大学“交叉学科研究生高水平课程”建设项目是华中科技大学“双一流”建设项目“拔尖创新人才培养计划”中的子项目，用于支持跨院（系）、跨一级学科的研究生高水平课程建设，这些课程作为选修课对学术型硕士生和博士生开放。与之配套，华中科技大学与华中科技大学出版社组织撰写了本套交叉学科研究生高水平课程系列教材。

研究生掌握知识从教材的感知开始，感知越丰富，观念越清晰，优秀教材使学生在学习过程中获得的知识更加系统化、规范化。本套丛书是华中科技大学交叉学科研究生高水平课程建设的重要探索。不同学科交叉融合有不同特点，教学规律不尽相同，因此每本教材各有侧重，如：《学习记忆与机器学习实验原理》旨在提高学生在课程教学中的实践能力和自主创新能力；《代谢与疾病基础研究实验技术》旨在将基础研究与临床应用紧密结合，使研究生的培养模式更符合未来转化医学的模式；《高分子材料3D打印成形原理与实验》旨在将实验与成形原理呼应形成有机整体，实现基础原理和实际应用的具体结合，有助于提升教学质量。本套丛书凝聚着编者的心血，熠熠生辉，此处不一一列举。

本套丛书的编撰得到了各方的支持和帮助，我校100余位师生参与其中，涉及基础医学院、机械科学与工程学院、环境科学与工程学院、化学与化工学院、药学院、生命科学与技术学院、同济医院、人工智能与自动化学院、计算机科学与技术学院、光学与电子信息学院、船舶与海洋工程学院，以及



材料科学与工程学院 12 个单位的 24 个一级学科, 华中科技大学出版社承担了编校出版任务, 在此一并向所有辛勤付出的老师和同学表示感谢! 衷心期望本套丛书能为提高我校交叉学科研究生的培养质量发挥重要作用, 诚恳期待兄弟高校师生的关注和指正。

解孝林

2019 年 3 月于喻园

前言

Qianyan

当今信息技术当之无愧登上人类科学技术发展的顶峰,令人类“上知天文下知地理”,颇已具备“千里眼顺风耳”等各项广大神通。而人体生命健康之谜尚待信息技术来加以破解。医学主要研究人类的生命健康,是性命攸关之学。医学图像乃人眼可观之生命健康信息,若善加分析,必可用来救死扶伤。故今信息技术之发展必然要惠及医学图像的处理与分析。以高度发达的信息技术治病救人,直接造福于人类,不亦善哉?

昔医者必擅望、闻、问、切,望为医技之首。然凡夫肉眼所见,实为二维图像。表疾可望,内疾难及。而由表及里者自古寥寥,非神医不可为也。三维医学成像技术可透视人体,洞观五脏六腑,而肌体无侵,毫发无损。被视者肝胆被照竟不受肌肤切割之苦,实已超越凡夫肉眼之所为,盖皆拜信息技术发达之所赐。

然三维成像之后,尚未功成。仍需以信息技术之神技,或对患者三维影像施以解构剖析、条分缕析,以明辨器官及病灶之所在,谓之三维医学图像分割;或对患者三维影像施以辗转腾挪、牵拉扭拽,以相互匹配对照而令病魔露出马脚,谓之三维医学图像配准;凡此种种,不一而足,皆谓之三维医学图像处理与分析之技术也。

三维医学图像处理与分析神功虽可辨妖识魔,然真经难求。当今信息爆炸时代,相关学术著作汗牛充栋,初学者恐踟躇彷徨不得法门而入。本书以三维医学图像处理软件设计与开发为主题,从实战入手,力求理论与实践相结合,学以致用,从零基础快速入门一直介绍到最新的深度学习方法,攻略秘籍皆和盘托出以飨读者,不求尽善尽美,但求读者学到即可使用。

然今日科技之进步一日千里,作者才疏学浅,仓促成稿,疏漏在所难免。读者若有发现,敬请批评指正,不吝赐教。

若本书对任何有志学习三维医学图像处理与分析技术的读者可助得一臂之力,实乃作者之幸也。以此为盼。

金人超

2018年12月于华中科技大学

目录

Mulu

第 1 章 零基础快速入门	/1
1.1 ITK-SNAP	/1
1.2 三维医学图像的种类	/9
1.3 DICOM	/15
1.4 从头开发三维医学图像处理与分析软件	/19
第 2 章 三维医学图像的分割	/40
2.1 分割简介	/40
2.2 传统阈值法	/43
2.3 Otsu 阈值法	/45
2.4 基于区域的分割方法	/46
2.5 活动轮廓法	/50
2.6 水平集方法	/55
2.7 三维 CT 图像中肝区与肝段的分割	/60
第 3 章 三维医学图像的配准	/75
3.1 elastix	/75
3.2 图像配准的基础理论	/81
3.3 transformix	/91
3.4 使用 vv 和 elastix 的配准实战	/93
3.5 基于 elastix 开发自己的配准软件	/97
第 4 章 基于深度学习的三维医学图像分析	/104
4.1 Python	/104
4.2 Jupyter 笔记本	/105
4.3 OpenCV	/107
4.4 读入 DICOM 图像	/108
4.5 深度学习入门实战案例:区分胸部和腹部 X 光片	/111
参考文献	/116

第 1 章

零基础快速入门

三维(3D)医学图像处理与分析软件与普通二维图像处理软件的不同之处主要在于处理对象的不同、处理方法的不同,以及处理目的的不同。

第一,处理的对象是三维的医学图像,包括计算机断层成像(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)等的图像,具有与普通二维图像完全不同的文件存储格式。第二,三维的医学图像要显示在二维的显示装置上,如何最大限度地显示三维立体信息,以方便医生进行三维的观察和操作?这是三维医学图像处理软件必须面对的新问题。第三,二维的图像处理算法应用到三维的数据上是否适用?需要哪些变化来扩充和适应三维的图像?第四,医生处理医学图像的目的是诊断和治疗疾病,这是整个医学过程的一个部分,具有深厚的医学背景,涉及深度医学知识和理论。

本书力图通过具体的实践实例,由浅入深地讲解三维医学图像处理与分析软件的开发方法及其背后的算法、理论。

三维医学图像处理与分析软件是什么样的?例子是最好的讲解办法。感谢互联网开源社区给我们提供了丰富的开源软件,以作为教学示例。在三维医学图像处理与分析领域,有一些非常好的成熟的开源软件平台,本书中我们会陆续介绍很多,首先这里我们要介绍的ITK-SNAP就是其中一个。

1.1 ITK-SNAP

ITK-SNAP是一个开源的用于分割3D医学图像中的结构的软件应用程序,其网址如下:

<http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>

1.1.1 简介

在浏览器中打开上面这个网址,就会进入它的官方网站,可以看到它的首页,如图1-1所示。

这一页的介绍翻译成中文是:

ITK-SNAP是用于分割3D医学图像结构的软件应用程序。它是美国宾夕法尼亚大学

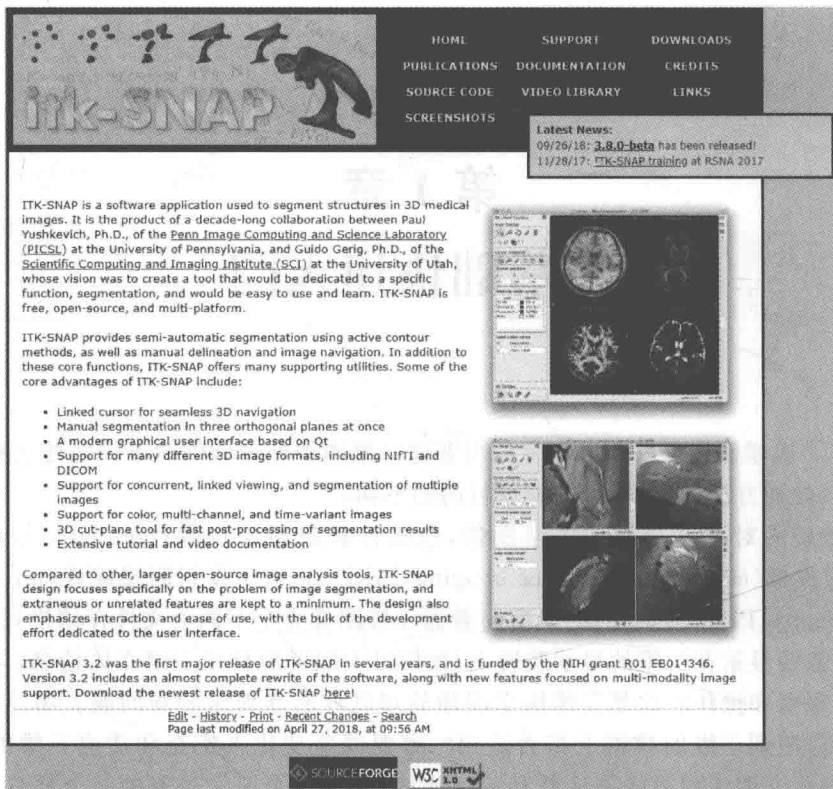


图 1-1

图像计算与科学实验室 (PICSL) 的 Paul Yushkevich 博士和美国犹他大学的科学计算与成像研究所 (SCI) 的 Guido Gerig 博士长达十年的合作成果,其愿景是创建一个专用于“分割”这一特定功能的工具,并且易于使用和学习。ITK-SNAP 是免费的、开源的,支持多平台。

ITK-SNAP 提供使用主动轮廓方法的半自动分割,以及手动描绘和图像导航功能。除了这些核心功能外,ITK-SNAP 还提供许多起支持作用的实用程序。ITK-SNAP 的一些核心优势包括:

- (1) 联动光标无缝 3D 导航;
- (2) 可同时在三个正交平面上手动分割;
- (3) 具有基于 Qt 的现代图形用户界面;
- (4) 支持许多不同的 3D 图像格式,包括 NIFTI 和 DICOM;
- (5) 支持多个图像的并发、联动查看和分割;
- (6) 支持彩色、多通道和时变图像;
- (7) 具有 3D 切割平面工具,用于分割结果的快速后处理;
- (8) 具有丰富的教程和视频文档。

与其他所需运行空间更大的开源图像分析工具相比,ITK-SNAP 设计专注于图像分割问题,并将无关的特征保持在最低限度。该设计还强调交互和易用性,在用户界面上投入了大量的开发工作。

这里面提到了“主动轮廓方法”“分割”“联动光标”“Qt”“NIFTI”和“DICOM”等名词术

语,如果不知道是什么,先顾名思义一下好了,我们这里暂时不进行详细讲解,后面会在实际操作的学习过程中逐渐介绍。

1.1.2 安装

单击图 1-1 所示页面右上角的“DOWNLOADS”,就会跳转到该软件的二进制可执行文件的下载页面。之后我们可以单击“SOURCE CODE”下载它的源代码深入研究,但目前我们还只是入门阶段,因此先从二进制可执行文件入手学习比较容易。

该软件的二进制可执行文件的下载页面显示了目前可供下载的不同平台上的版本。最新稳定版是 ITK-SNAP 3.6.0,有 Windows、Linux、MacOS 三个平台版本供选择。本书采用 Windows10 平台进行学习,所以可单击“Windows Self-Install Package (64 bit)”进行下载。下载时会要求注册,如实填写资料进行注册,或单击页面右下角的“skip registration”按钮,就会得到最终的下载链接。下载后得到一个 .exe 文件,单击它即可完成安装。

安装后可以在 Windows“开始”菜单找到并运行该软件。如果安装没问题,运行时会弹出程序主窗口,如图 1-2 所示。

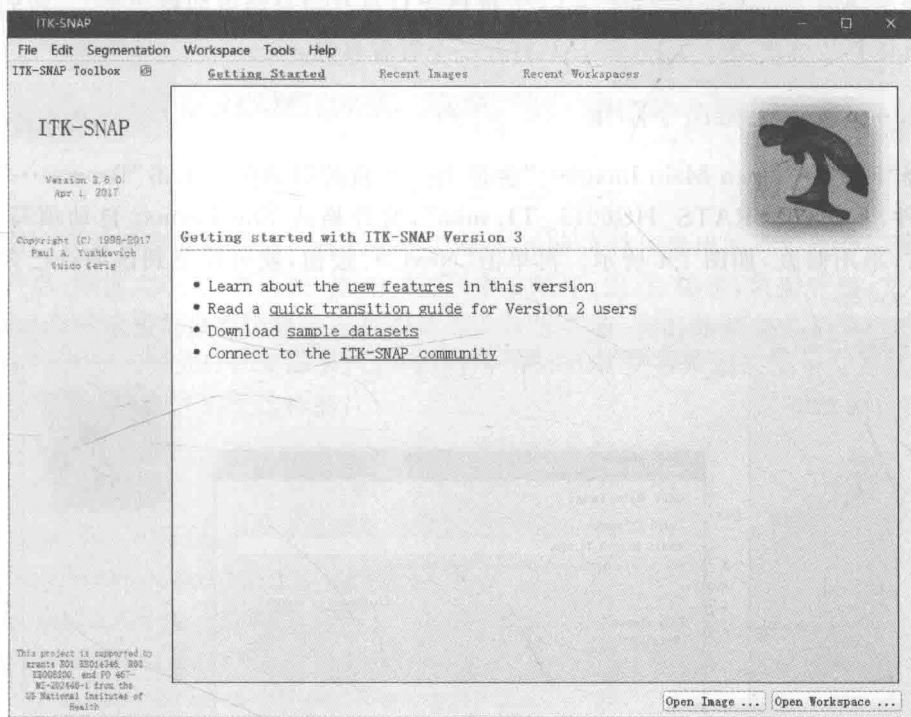


图 1-2

1.1.3 下载三维医学图像

作为初学者,我们先在图 1-2 所示窗口中找到并单击“sample datasets”,从而下载例子数据集。网页上列出了 5 个数据集,如图 1-3 所示。

我们以第一个数据集为例。单击“Multi-modal brain tumor MRI”(多模态脑肿瘤磁共振成像),会下载到一个数据压缩文件包 braintumor.zip。这里我们又接触到几个词:多模

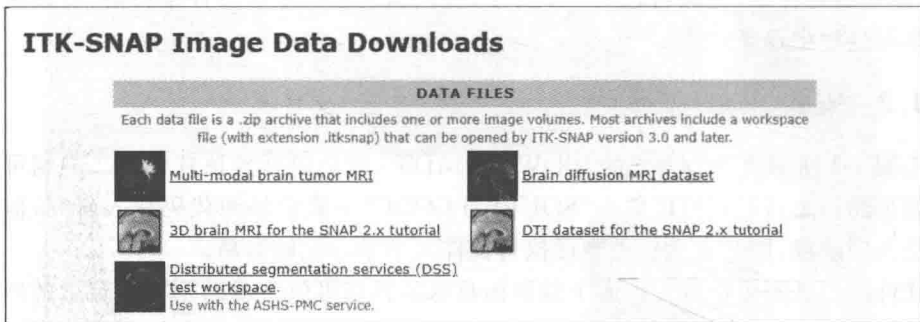


图 1-3

态,磁共振成像 MRI。还是暂时不讨论它们是什么意思,先往下动手操作。

按自己的操作方便,将下载到的压缩文件 braintumor.zip 放在任意目录下解压,即得到若干后缀为.mha 的数据文件,它们就是我们想看的三维医学图像数据文件。解压出来的其他文件我们并不需要,不用理会。

医学图像的文件格式有多种,.mha 文件格式只是其中最简单的格式之一,我们暂且不管它的具体存放格式,先用 ITK-SNAP 打开一个看看再说。

1.1.4 载入三维医学图像

选择“File”→“Open Main Image...”会弹出一个新的对话框。单击“Browse...”选一个.mha文件,不妨选“BRATS_HG0015_T1.mha”,文件格式 File Format 自动填写了“MetaImage”,不用修改,如图 1-4 所示。再单击“Next>”按钮,就可以见到该期待已久的三维

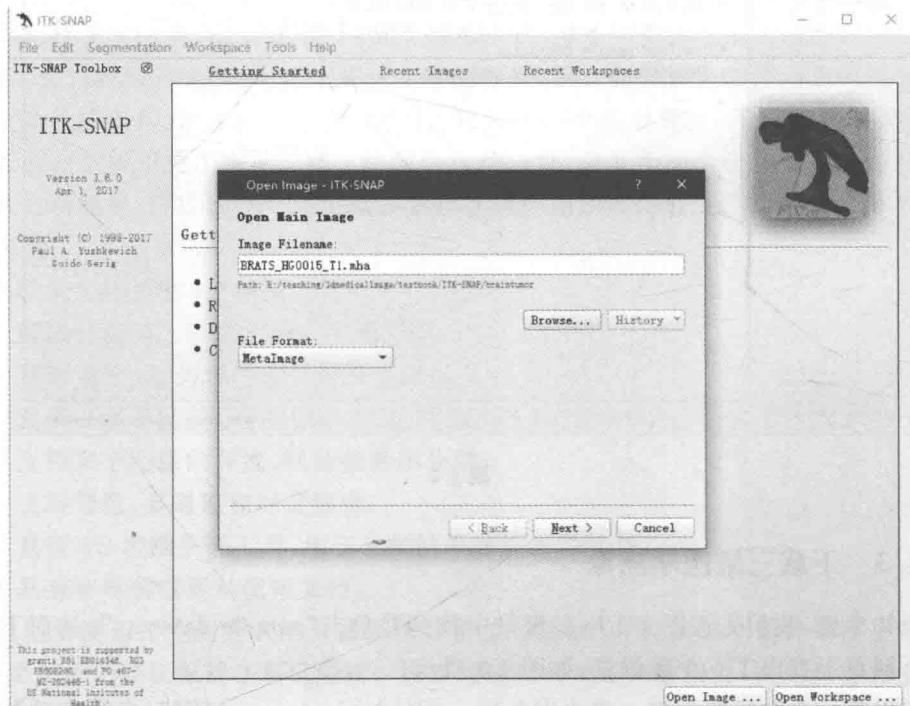


图 1-4

医学图像了,如图 1-5 所示。

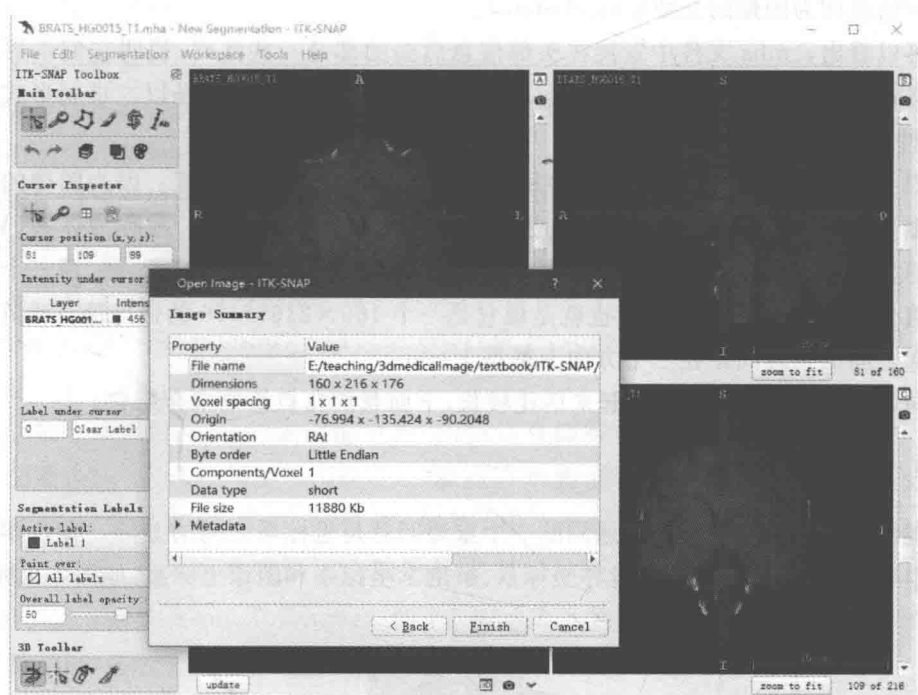


图 1-5

先别忙,看看弹出的对话框。框上显示了刚从 .mha 文件中读出的有关这个图像的一些信息:文件名,维度大小,体素间距,原点,朝向,字节顺序,组件/体素,数据类型,文件大小,元数据等。显然这些信息对于显示三维图像是非常重要的,它们都以文本字符串的形式保存在 .mha 文件的开头部分。实际上,如果我们用 Windows 记事本或写字板打开这个 .mha 文件,就会发现其文件开头是这样的:

```
ObjectType =Image
NDims =3
BinaryData =True
BinaryDataByteOrderMSB =False
CompressedData =True
CompressedDataSize =2272458
TransformMatrix =1 0 0 0 1 0 0 0 1
Offset =-76.994 -135.424 -90.2048
CenterOfRotation =0 0 0
AnatomicalOrientation =RAI
ElementSpacing =1 1 1
DimSize =160 216 176
ElementType =MET_SHORT
ElementDataFile =LOCAL
```

注意:上面代码未完,后面还有很多乱码。



ITK-SNAP 只是把这些文件头部信息读出、显示在对话框中而已。我们通常把文件头部的这些信息称为图像的元数据(metadata)。

还可以看出,.mha 文件中紧接在头部信息后面的都是一些乱码,说明它们不再是字符串文本格式的数据,而是二进制数据了。也就是说,所有图像的数据是以二进制形式存放在 .mha文件头部后面的主体部分。

MRI 图像是三维的实数阵列,其中每个实数称为一个图像强度值。因为图像的基本单元从二维个体变成了三维个体,所以将图像的基本单元从像素(Pixel)改称为体素(Voxel)。从对话框显示的文件头部信息可以看出,我们打开的这个 MRI 图像的宽、高、深三个维度的尺寸数值分别是 160、216 和 176,也就是说它是一个 $160 \times 216 \times 176$ 的强度值三维阵列。

体素之间的物理间距在三个方向上都是 1 mm。

朝向(Orientation)的定义说起来话比较长,下面我们花点篇幅来介绍它。

1.1.5 三种坐标系

处理医学图像和应用程序时遇到的一个重要问题是坐标系之间的差异。在医学图像分析应用中通常使用三种坐标系:世界坐标系、解剖学坐标系和图像坐标系,如图 1-6 所示。

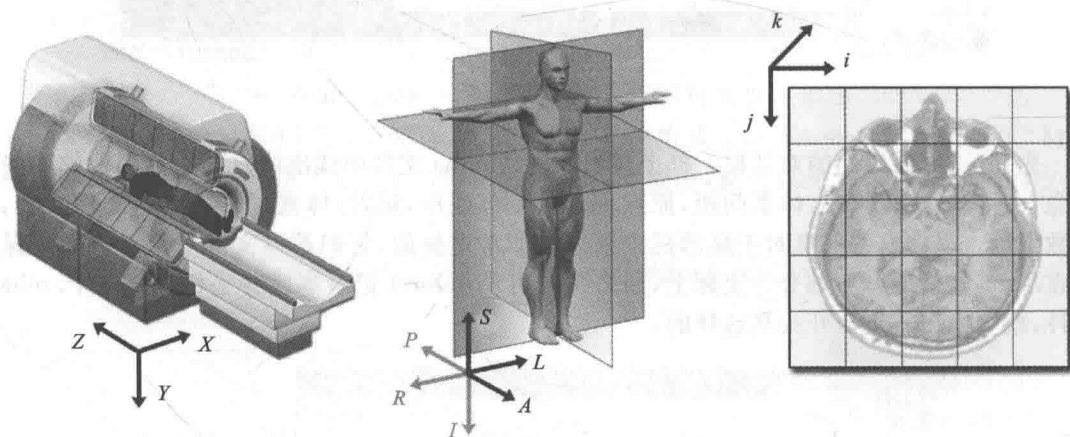


图 1-6

每个坐标系都有其特点,并以不同的方式表示人体的医学图像数据。

1. 世界坐标系

世界坐标系通常是笛卡儿坐标系,各模型(如 MRI 扫描仪或患者)都定位于其中。每个模型都有自己的坐标系,但只有一个世界坐标系来定义每个模型的位置和方向。

2. 解剖学坐标系

用于医学成像技术的最重要的模型坐标系是解剖学坐标系(也称为患者坐标系)。这个坐标系空间由三个平面组成,用于描述人类的标准解剖位置:

- (1) 轴向面平行于地面并分离头部(superior)和脚(inferior);
- (2) 冠状面垂直于地面并分离正面(anterior)和背面(posterior);
- (3) 矢状面垂直于地面并隔开左(left)和右(right)。

解剖学坐标系是连续的三维空间,一旦建立就表示已对图像进行了采样。然而,不同的医学应用使用不同定义。

3. 图像坐标系

图像坐标系描述了如何相对于解剖结构来获取图像。医疗扫描仪从图像左上角开始创建规则的矩形点和单元阵列。

图像中的每个体素由三个坐标 (i, j, k) 表示,其中 k 表示体素所属的切片序号, j 表示切片中的行序号, i 表示列序号。为了正确显示图像,ITK-SNAP需要知道这个 (i, j, k) 图像坐标系统和患者坐标系之间的映射。换句话说,ITK-SNAP需要知道方向 i, j, k 与人体内左(left)—右(right),前(anterior)—后(posterior)或上(superior)—下(inferior)方向之间的映射。

除了每个体素 (i, j, k) 的强度值之外,图像还存储解剖坐标的原点(origin)和间距(spacing)。原点表示解剖坐标系中第一个体素 $(0, 0, 0)$ 的位置,例如 $(100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, -25 \text{ mm})$;间距指定沿每个轴的体素之间的距离,例如 $(1.5 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm})$ 。图 1-7 所示是一个二维图像示例,显示了原点和间距的含义。

使用原点和间距,可计算图像坐标系中每个体素在解剖学坐标系中的对应位置。从图 1-5 可以看出,本次图像坐标系的原点 $(0, 0, 0)$ 在解剖学坐标系中对应的位置是 $(-76.994, -135.424, -90.2048)$ 。

RAI 代码可快速指定图像方向。三个字母中的每一个都是患者坐标系中方向的缩写,即 R 代表 right—left,从右往左;A 代表 anterior—posterior,从前往后;I 代表 inferior—superior,从下往上。

例如,代码 ASR 表示:X 轴对应于前—后(anterior—posterior)方向,Y 轴对应于上—下(superior—inferior)方向,Z 轴对应于右—左(right—left)方向。

体素强度值是 short 类型,以小端模式(Little Endian,从低字节到高字节)存放。

现在单击图 1-5 中的“Finish”按钮关闭对话框。

1.1.6 观察三维医学图像

观察三维医学图像分如下三步进行。

1) 熟悉控制面板

加载灰色图像后,ITK-SNAP 将置于手动分割模式,如图 1-8 所示。此模式的控制面板显示在左侧。它分为四个子面板,最上面是主工具条“Main Toolbar”,它包含两排按钮,被用来选择与 ITK-SNAP 交互作用的不同模式。刚开始选择的是第一个十字线模式,所以对应下面的第二个子面板为光标检查器“Cursor Inspector”。下面还有分割标签“Segmentation Labels”和三维工具条“3D Toolbar”两个子面板。

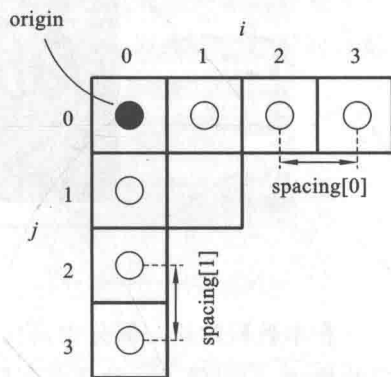


图 1-7

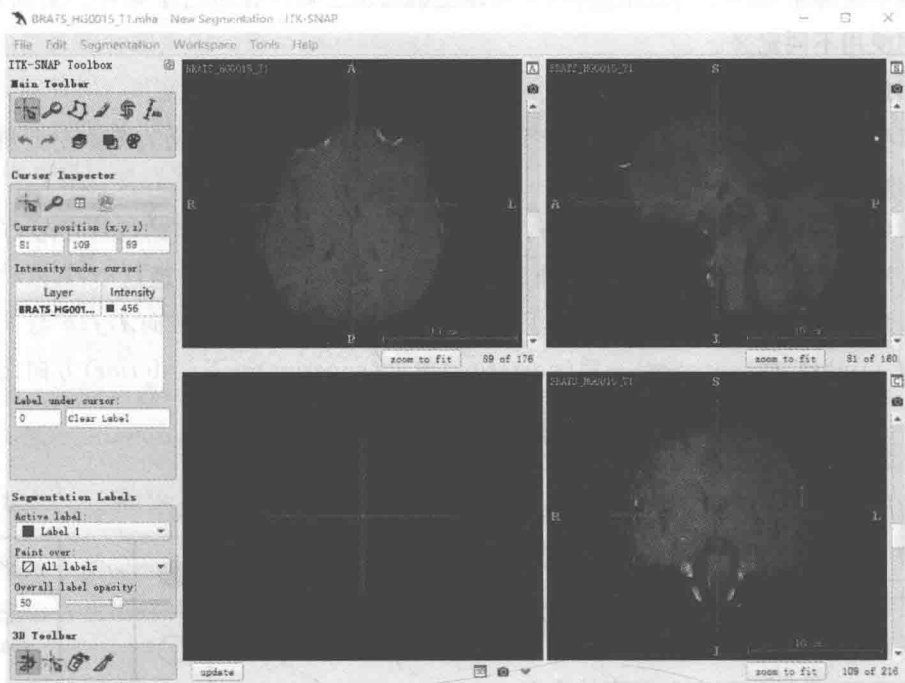


图 1-8

在本教程的这一部分中,我们将学习如何在主工具条中使用这些工具中的一个——十字线模式,它提供了一种快速浏览三维图像方法。

2) 查看正交切片

目前,几乎所有的常规影像呈现装置(显示屏、胶片、纸张)呈现的图像都是二维的,甚至我们人类的视网膜本身,就是一个二维装置。因此即使 CT、MRI、PET 等技术获得的医学影像数据是三维的,我们也无法直接观察它们。我们还是按照人类观察三维物体的常规方法,将三维物体用不同的平面进行剖切,然后通过观察多个平面二维影像,在我们的脑海里重建出目标的三维影像。

需要注意的是,投影图像和剖面图像是不同的图像,这是造成 X 射线拍片图像与我们现在观察的三维剖面图像不同的主要原因。

首先要确定从哪个方向进行观察。让我们将注意力集中在显示体积图像切片的四个暗窗口中的三个(即图 1-8 中除了只有十字线的图的另三个),第四个窗口用于显示 3D 渲染图像,将稍后讨论。这三个切片窗口在解剖学坐标系(轴向面、冠状面和矢状面)中显示图像体积的三个视图,如图 1-9 所示。

请注意,滚动条位于每个切片窗口旁边。在每个滚动条下方有一个切片计数器,它显示对应切片的索引和垂直于切片的方向上的切片总数。

使用滚动条更改切片窗口中当前显示的切片,可以通过鼠标轻易实现,但需确保鼠标光标位于要与之交互的切片窗口内。

ITK-SNAP 的一个关键特性是三个切片不是独立查看的,而是由一个共同的光标联动。

当我们操纵滚动条时,会注意到其他两个切片窗口中的蓝线正在移动。这些蓝线表示正交切片之间的交点。十字线就是图中的蓝色直线,其交叉点代表正在观察的点。三个不同方向的切片图像中,三个交叉点始终是指向三维体积中的同一点。这就是我们前面所说的光标联动。我们很快就会看到,通过光标可以轻松检查任何特定体素附近的体积图像。

3) 以十字线模式浏览图像

十字线模式用于将三个幻灯片视图快速聚焦到图像中的某个位置。当我们单击其中一个切片时,将调整其他两个切片,以便我们单击的像素成为三个切片的交叉点。因此,我们可以轻松检查任何体素附近的图像的正交视图。

我们也可以按住鼠标左键并在切片周围移动鼠标以加快浏览速度;可以使用鼠标滚轮更改当前显示在鼠标下切片窗口中的切片,而无须将鼠标移离切片窗口。

十字线光标的位置坐标,所指体素的灰度级强度(intensity)和与其对应的分割标签显示在控制面板的“Main Toolbar”子面板中:由于我们尚未进行任何分割,因此每个体素的分割标签数值都为0,如图1-10所示。

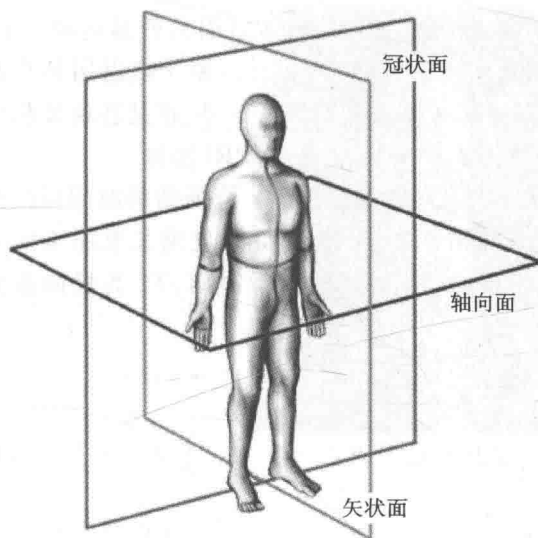


图 1-9

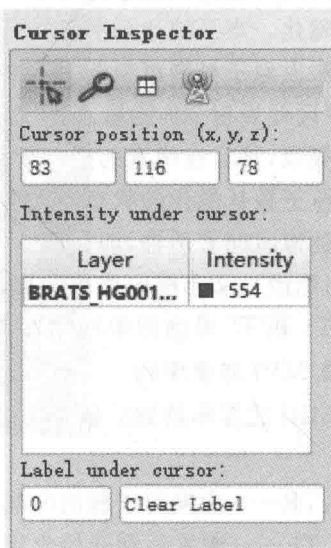


图 1-10

1.2 三维医学图像的种类

通过1.1节中对ITK-SNAP的实际操作学习,我们现在已经对三维医学图像有了一个初步的感性认识。目前常见的三维医学图像主要是MRI、CT和PET图像,以下做一个简单介绍。