

医学图像配准技术与应用

吕晓琪 张宝华 杨立东 赵 瑛 著



科学出版社

医学图像配准技术与应用

吕晓琪 张宝华 杨立东 赵 瑛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述了与医学图像配准相关的基础知识和多种配准算法,并介绍了将配准图像应用于图像融合、多维可视化和虚拟内窥镜等领域的方法。

本书包括三大部分:第一部分(第1~3章)涉及图像配准技术基础知识,阐述图像配准的原理、基本流程、分类和常用的技术,结合常用的搜索策略,介绍了特征空间和搜索空间的相关定义和常用算法。第二部分(第4~6章)介绍了配准对象分类方法、现有配准算法的原理和流程,目前常用的配准算法和配准效果评价标准。第三部分(第7~9章)介绍了医学图像融合和融合结果评价方法,以及配准图像在多维可视化和虚拟内窥镜中的应用,说明了配准图像在虚拟手术导航中的应用前景。

本书可作为信息处理、模式识别和生物医学工程等相关专业的教材,也可作为相关领域研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

医学图像配准技术与应用 / 吕晓琪等著. —北京: 科学出版社, 2015.3
ISBN 978-7-03-042856-1

I. ①医… II. ①吕… III. ①医学摄影—图像处理 IV. ①R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 304358 号

责任编辑: 陈 静 邢宝钦 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张: 21 1/4 插页: 4

字数: 520 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

在以获取综合信息为目标的图像分析过程中，图像配准是关键技术之一。20 世纪 90 年代发展起来的医学图像配准技术是医学图像处理的一个重要分支。在进行医学图像分析时，经常要将同一患者的几幅图像放在一起分析，从而得到该患者多方面的综合信息，提高医学诊断和治疗的水平。针对几幅不同的图像做定量分析，首先要解决这几幅图像的严格对齐问题，即图像的配准。

医学图像配准是指针对一幅医学图像寻求一种(或一系列)空间变换，使它与另一幅医学图像上的对应点达到空间上的一致。这种一致是指人体上的同一解剖点在两张匹配图像上有相同的空间位置。配准的结果应使两幅图像上所有的解剖点，或至少是所有具有诊断意义的点及手术感兴趣的点都达到匹配。

虽然在成像过程之前也可以采取一些措施减小由身体移动等因素引起的空间位置误差，提高配准精度，但医学图像配准技术主要讨论的是数据获取后的配准，也称为回顾式配准。当前，国际上关于医学图像配准的研究集中在断层扫描图像(如 CT、MRI、SPECT、PET 等)和时序图像(如 fMRI 和 4D 心动图像)的配准问题。寻找在医学图像领域通用有效的图像配准技术已成为一个主要研究方向。图像配准的高精度、图像配准算法的强鲁棒性、图像配准算法的配准速度以及图像配准的自动化一直以来都是图像配准领域不断追求的目标。

由于客观世界的复杂性、广泛存在的不确定性以及人类认识上的局限性，医学图像分析和处理中仍有许多难点问题在理论上和实际应用上未能很好解决。虽然医学图像配准在理论及应用上都有了很大的发展，也增添了许多新的内容，但仍缺乏一本及时反映医学图像配准技术发展的专著。其是以现代新理论、新技术应用为支撑，以解决目前面临的医学图像配准问题为动力，而形成的医学图像配准技术及应用的知识体系。

本书在编写中，力图体现理论性、实用性、系统性的结合。在内容上贴近实践应用，选取了相关基础理论和最新研究成果作为全书的主要内容，既照顾到了初学者的知识背景，又可供本领域研究人员了相关领域的最新进展，具有一定的深度和广度，希望读者能通过本书的学习更全面地掌握本领域的基本理论、技术和发展方向。本书在内容叙述上，力求理论概念严谨，论据简明扼要。考虑到图像技术的应用特点，书中列举了大量实例，便于读者理解和拓展认识。

本书试图在总结过去研究工作的基础上阐述医学图像配准技术的基础理论、技术方法及应用实践，为医学图像配准研究提供理论基础和应用指向。全书共 9 章。第 1 章作

为全书的铺垫是对医学图像配准技术基本知识的介绍；第2、3章是对图像配准技术基础理论的介绍；第4~9章是对医学图像配准技术方法及应用实践内容的介绍。本书由吕晓琪、张宝华、杨立东、赵瑛共同撰写，其中第1章由杨立东撰写；第2、3章由赵瑛撰写；第4章由张宝华撰写；第5、6章由吕晓琪撰写；第7、8章由张宝华、杨立东撰写；第9章由杨立东、赵瑛撰写。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金“基于物理模型的非刚性医学图像配准算法研究”(61179019)、“基于非刚性配准的多模型医学图像融合技术研究”(60761002)、“远程医疗信息系统关键技术研究——医学图像压缩与融合算法研究”(60361002)的支持，以及其他横向研究课题的支撑，特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。本书的编写始于2013年，喻大华、谷宇、黄显武、贾东征和任国印老师以及王海录、姜伟、于荷峰、李迎辉等多名学生先后参与本书的修订，作者在此表示衷心的感谢。书中部分内容参考了有关单位或个人的研究成果，均已在参考文献中列出，在此一并致谢。

本书追求的目标是介绍现代较新的理论、方法及其应用，这给编撰本书增添了难度。由于作者水平所限，虽几经改稿，书中难免有疏漏之处，欢迎广大读者不吝赐教。

作 者

2014年9月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 图像配准概述	1
1.1.1 图像配准的数学定义	2
1.1.2 图像配准的基本框架	3
1.1.3 图像配准方法的分类	4
1.1.4 图像配准的步骤	6
1.2 图像配准在医学领域的应用	8
1.2.1 医学图像配准的发展历史	8
1.2.2 配准技术的应用	8
1.2.3 医学图像配准的国内外研究现状和面临的问题	9
1.2.4 医学图像的配准方法	10
1.2.5 常用的医学图像配准技术及其应用	10
1.3 全书框架	12
参考文献	13
第 2 章 特征空间和搜索空间	17
2.1 特征空间	17
2.1.1 点检测	17
2.1.2 线检测	19
2.1.3 Hough 变换	20
2.1.4 边缘检测	24
2.1.5 水平集	43
2.2 搜索空间	50
2.2.1 平移变换	51
2.2.2 旋转变换	52
2.2.3 缩放变换	55
2.2.4 仿射变换	56
参考文献	61

第 3 章	搜索策略	64
3.1	一维搜索算法	64
3.1.1	黄金分割法	64
3.1.2	进退法	64
3.1.3	抛物线法	65
3.1.4	Brent 方法	66
3.2	Powell 算法	67
3.2.1	基本 Powell 算法实现	67
3.2.2	改进的 Powell 算法	67
3.3	遗传算法	68
3.4	蚁群算法	74
3.5	物理模型	76
3.6	光流场模型	78
	参考文献	79
第 4 章	医学图像配准	80
4.1	配准对象分类	80
4.1.1	基于成像模式	80
4.1.2	基于主体来源	80
4.1.3	基于图像特征	81
4.2	基本原理	81
4.2.1	算法框架	81
4.2.2	算法流程	82
4.3	典型算法分类	88
4.3.1	像素级配准	90
4.3.2	特征级配准	90
4.3.3	基于形变模型的配准	91
4.4	图像配准质量评价	93
4.4.1	配准评价指标	93
4.4.2	评价方法	94
	参考文献	95
第 5 章	刚性医学图像配准算法及其实现	99
5.1	基于遗传算法的医学图像配准算法	100
5.1.1	算法思想与步骤	100
5.1.2	边缘提取	101
5.1.3	参数搜索	106

5.1.4	实验和结果分析	109
5.2	基于点集匹配的医学图像配准算法	111
5.2.1	算法思想与步骤	111
5.2.2	特征点提取	112
5.2.3	特征点匹配	114
5.2.4	实验和结果分析	119
5.3	基于互信息的 3D 图像配准	120
5.3.1	算法思想与步骤	120
5.3.2	相似性度量	123
5.3.3	3D 变换参数估计	124
5.3.4	优化搜索策略	125
5.3.5	互信息配准	128
5.3.6	实验和结果分析	130
	参考文献	143
第 6 章	非刚性医学图像配准算法及其实现	145
6.1	基于 B 样条的弹性医学图像配准	145
6.1.1	算法思想与步骤	145
6.1.2	B 样条函数	146
6.1.3	相似性度量	148
6.1.4	参数优化	151
6.1.5	实验和结果分析	151
6.2	基于三角形网格的非刚性医学图像配准算法	154
6.2.1	算法思想与步骤	154
6.2.2	全局刚性配准	155
6.2.3	特征点提取	160
6.2.4	特征点匹配	164
6.2.5	局部精确配准	168
6.2.6	实验和结果分析	169
6.3	基于光流场模型的非刚性医学图像配准算法	173
6.3.1	算法思想与步骤	173
6.3.2	特征向量提取	174
6.3.3	特征向量匹配	177
6.3.4	粗配准	178
6.3.5	精配准	178
6.3.6	实验和结果分析	181

参考文献	186
第 7 章 配准图像在图像融合中的应用	189
7.1 像素级医学图像融合	189
7.1.1 加权平均法	189
7.1.2 对比度调制法	190
7.1.3 基于图像分割的图像融合	194
7.1.4 小波域图像融合	197
7.1.5 Contourlet 域图像融合	203
7.2 特征级医学图像融合	209
7.2.1 基于纹理提取的图像融合算法	209
7.2.2 基于聚类划分的图像融合方法	215
7.3 融合图像结果评价	221
7.3.1 主观评价	222
7.3.2 客观评价	222
7.3.3 评价指标选取	228
7.3.4 小结	229
参考文献	230
第 8 章 配准图像在多维可视化中的应用	233
8.1 医学图像三维可视化技术	233
8.1.1 概述	233
8.1.2 面绘制方法	234
8.1.3 体绘制方法	240
8.1.4 其他方法	247
8.2 三维可视化交互技术	248
8.2.1 多平面切割	248
8.2.2 任意平面切割	250
8.2.3 长方体切割	254
8.2.4 三维空间定量测量	255
8.2.5 三维可视化演示	257
8.3 医学图像四维可视化技术	265
8.3.1 概述	265
8.3.2 空间分割算法	266
8.3.3 心电门控技术	268
8.4 心脏的四维可视化	274
8.4.1 心脏 CT 数据采集	274

8.4.2	心脏的四维可视化	274
8.4.3	四维心脏 VR 实现	275
8.4.4	四维心脏最大密度投影	276
8.4.5	四维可视化效果	277
8.5	感兴趣区域四维可视化	280
8.5.1	局部冠状动脉仿真	281
8.5.2	感兴趣体积提取	283
	参考文献	292
第 9 章	配准图像在虚拟内窥镜中的应用	294
9.1	概述	294
9.2	图像分割	295
9.2.1	阈值分割	296
9.2.2	区域生长分割	298
9.2.3	模糊聚类法	299
9.2.4	边缘检测分割法	299
9.2.5	实验结果与分析	300
9.3	路径规划	300
9.3.1	中心线规划技术	301
9.3.2	DFB 距离变换法	303
9.3.3	虚拟相机	306
9.3.4	系统实现	308
9.4	三维重建	309
9.4.1	概述	309
9.4.2	基于光线投射算法的体绘制方法	310
9.4.3	中心路径特性	311
9.4.4	基于 DFB 场的中心线自动提取算法	312
9.4.5	算法改进	317
9.4.6	提取中心线	321
9.5	虚拟内窥镜自动漫游	322
9.5.1	路径平滑	322
9.5.2	虚拟漫游实现	323
	参考文献	325

第 1 章 绪 论

图像配准(image registration)是将不同获取时间(time)、不同传感器(sensor)、不同获取条件的同一场景(scene)或者同一目标(object)的两幅或者多幅图像进行匹配的过程(Brown, 1992)。目前,图像配准技术已经被广泛应用于遥感图像处理、医学图像处理、计算机视觉等领域。

1.1 图像配准概述

在以获取综合信息为目标的图像分析过程中,图像配准是关键技术之一。例如,在图像融合时,配准结果直接影响融合图像的效果。图像配准应用领域概括起来主要有以下几个方面:

(1) 计算机视觉和模式识别(目标定位、自动质量控制、目标识别、特征识别等)(Horn, 1989);

(2) 医学图像分析(如肿瘤生长监测、血管造影、从电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)和磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)同时获取更完整患者信息等)(Stytz et al., 1991);

(3) 遥感数据处理(环境监测、天气预报、海洋勘探等)(Jensen, 1986)。

国外从 20 世纪 60 年代开始在图像配准领域进行研究,到了 20 世纪 70 年代陆续出现一些图像配准方法,例如,Anuta 等提出了使用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)进行互相关图像检测计算的图像配准技术,以提高配准的速度性能;Barnea 等提出了使用模板子图像差值相似性测度(similarity metric)的图像配准技术,它比使用 FFT 计算互相关相似性测度进行图像检测的方法有更高的性能(1972);序贯相似检测算法(Sequential Similarity Detection Algorithm, SSDA)定义了计算上更为简单的相似性度量准则,使在非归一化情况下仍可在匹配处获得极小值,并且没有乘法运算,该算法还提出了与准则相配合的序贯搜索策略,从而大大减少了运算量(Barnea et al., 1972);相位相关(phase correlation)技术是基于傅里叶变换的平移性质,该方法通过计算图像间的交叉功率谱来配准图像间产生的平移(Kuglin, 1975)。直到 1980 年配准技术才开始引起学者的密切关注,相继产生了一些被广泛使用的典型图像配准方法。例如,交叉相关(cross-correlation)法是最基本的基于灰度统计的图像配准方法,它通常被用来进行模板匹配和模式识别(Rosenfeld et al., 1982)。Lee 等把图像配准变换到倒谱域进行(1987)。而 Castro 在相位相关的基础上加入了旋转变换(1987)。

通过 Hausdorff 距离计算二值图像的方法也被提出 (Huttenlocher et al., 1993), 该方法在像素定位方面性能优于交叉相关法。互信息法 (Mutual Information, MI) 由 Viola 和 Collignon 等分别引入图像配准领域, 该方法基于香农在信息论中提出的交互信息相似性准则, 其初衷是为了解决多模态医学配准问题 (Viola et al., 1997; Collignon et al., 1995)。到 20 世纪末, 单模图像配准问题已基本解决, 但多模图像配准由于涉及模式的复杂性和领域的多样性, 仍需密切关注。最近十年里有 33000 多篇的学术论文在研究图像配准问题。通过 SCI 和 EI 检索到的相关文章数量如图 1.1 所示。

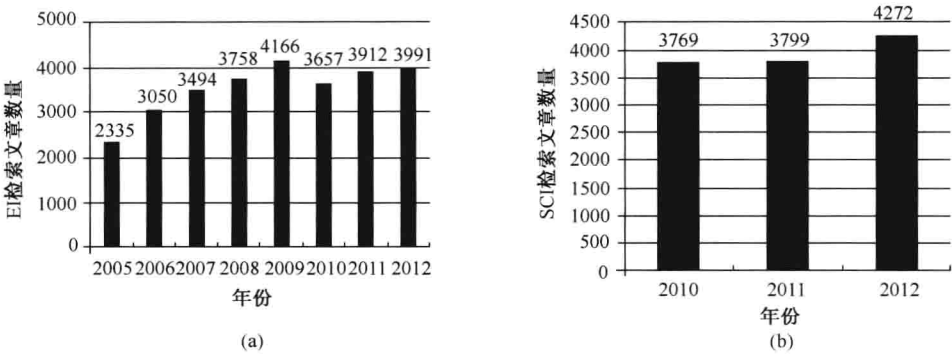


图 1.1 近年图像配准相关检索文章数量

在国内, 图像处理技术虽然起步相对较晚, 但是近期也获得了很大的发展。吴健康使用 Hough 变换配准陆地卫星多光谱图像 (1985)。罗晓慧提出了基于特征和灰度的影像配准方法 (1993)。王小睿等提出并实现了一种使用互相关系数作为相似性测度的自动图像配准方法, 用于图像的高精度配准 (1997)。郭海涛等 (2001) 提出了一种将遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 用于图像配准的算法。

近年来, 不论在国内还是国外, 图像配准技术都发展得非常迅速, 并且取得了很多研究成果。目前, 像素级图像配准算法已基本成熟, 亚像素级正在快速发展, 并得到越来越广泛的应用。

在今后一段时间内, 在医学图像、遥感、计算机视觉等诸多领域寻找快速、有效的图像配准技术成为一个主要研究方向。此外, 随着三维打印机的出现, 三维图像配准也引起广大研究人员的兴趣。图像配准的高精度、图像配准算法的强鲁棒性、图像配准算法的配准速度, 以及图像配准的自动化一直以来都是图像配准领域所不断追求的目标。

1.1.1 图像配准的数学定义

图像配准可以定义为两幅图像在空间和灰度上的映射。设用已知尺寸的二维阵列 I_1 和 I_2 表示两幅图像, $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 分别表示对应点上的灰度值 (也可以是其他度量值), 那么图像间的映射关系可以表示为

$$I_2(x, y) = g(I_1(f(x, y))) \quad (1.1)$$

式中, f 表示二维空间坐标的变换函数; g 表示灰度映射函数。

图像配准的主要任务就是找到最优的空间和灰度变换, 使图像得到最佳匹配。通常在图像预处理阶段就已经进行了灰度变换 g , 所以解决配准问题的关键就变成了寻找空间或几何的变换, 这一变换可以使用函数 f_x 和 f_y 表示为

$$I_2(x, y) = I_1(f_x(x, y), f_y(x, y)) \quad (1.2)$$

这样在图像配准过程中, 匹配问题就简单一些。

1.1.2 图像配准的基本框架

Brown(1992)提出了图像配准的基本框架: 特征空间(feature space)、搜索空间(search space)、搜索策略(search strategy)、相似性度量(similarity measure)。

1. 特征空间

特征空间是指从图像中提取的可用于配准的特征集合。例如, 在基于灰度的图像配准中, 图像的特征空间就是其像素的灰度值。

在图像配准中提取的图像特征非常重要, 根据待配准图像的属性决定其特征空间的内容。这些特征应该是分布在图像中有特色的对象, 并且应该是容易获取的。要根据配准任务来选择不同的特征空间。例如, 空间坐标被有效应用于很多的同属性图像的配准, 不论自动配准还是人工配准, 控制点的选择是一个困难的过程。对于很多图像来说, 图像配准精度直接受控制点选择精度的影响, 而实际中控制点的数量和精度通常是很有限制的。

2. 搜索空间

搜索空间是指一系列可以配准图像的变换操作的集合, 以几何变换为主要因素。图像的几何形变可以分为三类: 全局的、局部的和位移场形式的。全局的变换通常基于矩阵代数理论, 用一个参数矩阵来描述整个图像的变换。典型的全局几何变换包括以下一种或几种: 平移、旋转、各向同性或各向异性的缩放、二次或三次多项式变换等。局部变换有时又称为弹性映射, 不同区域具有不同的变换参数模型。变换参数往往只是定义在特定的关键点上, 而在区域到区域之间进行插值。位移场方法, 有时候又称为光流场法, 使用(连续的)函数优化机制, 为图像中的每个点计算出一个独立的位移量, 并使用某种规整化机制进行约束。

图像的变换操作分为线性变换(linear transformation)和非线性变换(nonlinear transformation), 线性变换又包括刚体变换(rigid body transformation)、仿射变换(affine transformation)、投影变换(projective transformation), 如表 1.1 所示。

表 1.1 图像的变换类型

变换类型	反转	旋转	平移	缩放	投影	扭曲
刚体变换	具备	具备	具备	—	—	—
仿射变换	具备	具备	具备	具备	—	—
投影变换	具备	具备	具备	具备	具备	—
非线性变换	具备	具备	具备	具备	具备	具备

3. 搜索策略

搜索策略就是在搜索空间内对配准参数进行优化，并且以相似性度量的值作为判断是否最优的依据。在图像特征提取和配准过程中，涉及大量的计算任务，搜索策略成为一个不容忽视的问题。给定一组特征和参数化的形变，相似性度量和优化算法本身共同决定了搜索策略。例如，控制点结合最小二乘准则是一个很通用的变换参数确定方法，它通常用在基于特征的配准方法上。此外，常用的搜索策略还有 Powell 法、遗传算法、牛顿法、蚁群算法等。

4. 相似性度量

相似性度量用来评估搜索空间进行的变换操作结果的优劣，以便为下一步搜索提供依据。一般根据特征空间选择相似性度量，特征提取和相似性度量决定了配准算法的鲁棒性。值得一提的是，相似性度量的值直接决定了配准变换的选择，以及在当前变换模型下图像是否被正确匹配。目前，常用的相似性度量有归一化互信息、欧氏距离、相关性等。

1.1.3 图像配准方法的分类

配准方法分类可以依据不同的准则。Brown 依据变换模型的复杂程度对配准方法进行分类，如表 1.2 所示。Maintz 等提出了 9 条常用图像配准技术的分类准则，依次为图像维数 (dimensionality)、配准图像的基本属性 (nature of registration basis)、变换属性 (nature of transformation)、变换域 (domain of transformation)、交互性 (interaction)、优化策略 (optimization procedure)、模态 (modalities involved)、配准主体 (subject)、配准对象 (object)。Fitzpatrick 等结合 Brown 和 Maintz 的分类方法，将配准技术概括为 8 个方面。

表 1.2 图像配准的分类

多模态配准 (multimodal registration)	
分类	同一场景上由不同传感方式获得的图像的配准
典型应用	多传感器图像的信息融合
方法特点	通常需要建立传感模型和变换模型，由于灰度属性或对比度可能有很大的差异，所以有时需要灰度的预配准，而利用物体形状和一些基准标志可以简化该问题

续表

多模态配准 (multimodal registration)	
应用例子	(1) 医学图像领域: CT、MRI 图像结构信息融合。 (2) 遥感图像领域: 多电磁波段图像信息融合, 如微波、雷达、可视的或多谱段等; 场景分类, 如分类建筑物、道路、车辆、植被等
模板配准 (template registration)	
分类	在图像中为参考模板样式寻找最佳匹配
典型应用	在图像中识别和定位模板样式, 如地图、物体、目标物等
方法特点	基于模式, 预先选定特征, 已知物体属性, 高等级特征匹配
应用例子	(1) 遥感数据处理: 定位和识别定义好的或已知特征的场景如飞机场、高速路、车站、停车场等; (2) 模式识别、字符识别、标志确认、波形分析等, 如微波、雷达、可视的或多谱段等; 场景分类, 如分类建筑物、道路、车辆、植被等
观测点配准 (viewpoint registration)	
分类	对从不同观测点获得的图像进行配准
典型应用	深度或形状重建
方法特点	通常变形多为透视变换, 应用视觉几何和表面属性等的假设条件, 典型的方案是特征相关, 必须考虑阻挡问题
应用例子	从视角差异中构建三维深度和形状信息; 目标物的运动跟踪, 序列图像分析
时间序列配准 (temporal registration)	
分类	对同一场景上不同时间或不同条件下获得的图像的配准
典型应用	检测和控制变化或增长
方法特点	需要容忍图像中部分内容的差异和形变对配准造成的影响, 有时需要建立传感噪声和视点变换的模型
应用例子	(1) 医学图像处理: 数字减影血管造影 (Digital Subtraction Angiography, DSA)、注射造影剂前后的图像配准、肿瘤检测、白内障检测。 (2) 遥感数据处理: 自然资源监控、核生长监控、市区增长检测

- (1) 图像维度, 指图像空间的几何维数。例如, 在医学领域的图像可以是二维的也可以是三维的。
- (2) 配准图像来源, 指配准图像的自身属性。例如, 配准可以是基于已知对应关系的点对集合, 也可以是基于平面对应的集合。
- (3) 几何变换, 指不同空间中的点在对齐过程中, 采用的几何映射的数学表达形式, 该部分合并了 Maintz 提出的变换属性和变换域。
- (4) 交互性, 指通过人工操作配准算法完成对外部的控制。交互性有时比较简单, 就是一些参数的初始化, 有时也比较复杂, 例如, 在配准过程中, 需要根据中间配准结果成功与否进行调整。
- (5) 优化, 指在配准过程中, 根据对图像间配准质量的连续估计, 从而找到最优的配准算法。

(6) 模态, 指配准图像通过什么方式获取的。图像进行配准时会根据模态来选取配准方法。可以把模态分为单模态(monomodal)和多模态(multimodal)两种, 例如, 磁共振图像间配准就是单模态配准, 而磁共振图像与电子计算机断层扫描图像之间配准就是多模态配准。

(7) 主体, 指患者及其对应的关系, 包括同一患者、不同患者, 以及患者数据和图谱的配准。

(8) 对象, 指配准时感兴趣的分析区域。

通过查阅大量相关文献并结合自身的研究工作, 作者总结了一些常用的配准的分类方法: 根据空间维数, 若仅考虑空间维数, 则可以划分为 2D/2D, 2D/3D, 3D/3D; 如果考虑图像随时间变化的情况, 则还需要增加一个时间维度, 完成 2D/3D 和 3D/4D 配准。

内部特征指的是从图像内部本身提取的信息, 根据内部特征, 又可以细分为以下三类。

(1) 基于特征点: 在几何上有特别意义的可以定位的特征点集(如不连续点、图形的转折点、线交叉点等), 在医学图像上更可以是具有解剖意义的点。

(2) 基于表面: 用分割的方法提取出感兴趣的部分的轮廓(曲线或曲面), 作为用来比较的特征空间。

(3) 基于灰度值: 利用整幅图像的像素或体素来构成特征空间。根据灰度值的统计信息来计算相似性测度, 又可划分为最小二乘法、傅里叶法、互相关法、互信息法等。

根据外部特征, 在医学图像中, 通过在患者身上固定标记物或向体内注入显影物质以获得在图像上的确定的标记点, 称为外部特征点。

根据变换性质, 对图像进行空间变换可以分为刚体变换和非刚体变换。通常有刚体变换、仿射变换、投影变换和非线性变换。

根据优化算法, 当比较特征采用特征点集的形式时, 可以通过联立方程组来找到变换的解。但一般情况下, 配准问题都会转化为求解相似性测度最优值的问题, 在计算方法中通常需要采用合适的迭代优化算法, 如梯度下降法、牛顿法、Powell 法、蚁群算法等。

根据人工参与程度, 配准可以分为全自动式、半自动式和交互式。全自动式中使用者只需要提供相应的图像; 半自动式中使用者需初始化算法或指导算法; 交互式需要使用者介入进行配准。

1.1.4 图像配准的步骤

无论采用何种配准技术进行图像配准, 都需要经历以下四个步骤。

1. 特征选择

选取像闭合区域、边缘、轮廓、拐角等凸出的、明显的对象作为特征。为了进一步处理, 这些特征可以用其对应的点来表示, 一般称为控制点(Control Point, CP), 如用重心表示特征。

在选择特征的时候, 要根据所给配准任务来完成, 所选特征应该是在图像中常出现的有特点的对象, 并且应该是比较容易获取的。一般要求特征具有明确的物理意义。

所选特征集合必须在浮动图像和参考图像中拥有足够多的共同成分, 有时候甚至要求有相同的位置(当两幅图像包含的不是完全一样的场景或者图像发生意外变化时)。特征提取算法应该有精确的定位能力, 对图像退化(image degradation)不敏感, 在理想情况下, 不管图像是否发生一定的形变, 该算法都能提取出相同的特征。由于成像条件或者感光强度的不同, 相应的特征可能是不同的, 这实质上是因为特征描述和相似性度量选择不合适。特征描述应该具有稳定性, 同时还应在有意外变化或者噪声影响的条件下, 具有一定的区分度。

2. 特征匹配

在浮动图像与参考图像的特征上建立联系。在图像配准时, 根据图像特征的空间关系, 采用各种特征描述和相似性测度。

匹配算法应该具有鲁棒性和有效性, 使那些在其他图像上没有对应关系的单一特征不会影响算法的性能。

3. 变换模型的选择

在对准浮动图像和参考图像时建立描述映射关系函数的类型和参数, 映射函数的参数可以通过建立特征联系时获得。

描述图像获取过程等先验信息用来选择映射函数类型, 如果没有先验信息, 那么所选的模型应该具有灵活性和通用性。此外, 特征提取的精确程度、特征匹配的可靠程度和可以接受的近似误差等因素也影响着模型的选择。

4. 灰度插值和坐标变换

浮动图像通过映射函数进行变换, 在非整数坐标上的图像值将通过适当的插值技术得到。

插值属于再采样的一种, 在选取插值方法的时候, 既要考虑插值后图像的精确程度, 又要考虑相应的计算复杂程度。一般最近邻法(Nearest Neighbor, NN)和双线性插入法(bilinear interpolation)被用来完成再采样过程。

在很多配准实例中, 除了以上四步, 还需要在最后加上对配准效果的评价, 在本书中评价部分放在第4章做详细介绍, 此处不再赘述。