

陈显毅 编著

图像配准技术 及其MATLAB编程实现

- ◆ 全面系统的图像配准技术
- ◆ 深入浅出的实现原理机制
- ◆ 大量精巧的MATLAB 7.0源代码
- ◆ 典型实用的医学图像配准实例
- ◆ 简单明了的图像处理工具箱使用



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

图像配准技术及其 MATLAB 编程实现

陈显毅 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书重点介绍图像配准过程中涉及到的关键性技术,包括特征空间、搜索空间、插值技术、相似性度量和搜索策略五大方面的理论知识,并给出相应的 Matlab 源代码。最后,以一个配准实例说明图像配准的整体实现过程。

本书可作为从事图像配准、融合研究和应用的高校教师、研究生、高年级本科生及科研人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

图像配准技术及其 MATLAB 编程实现/陈显毅编著. —北京:电子工业出版社, 2009.5

ISBN 978-7-121-08621-2

I. 图… II. 陈… III. 图像处理—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 050291 号

责任编辑:史 涛

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/32 印张:7.5 字数:168 千字

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:19.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。
若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

随着新型传感器的不断涌现,人们获取图像的能力迅速提高,不同物理特性的传感器所产生的图像也不断增多。由于不同图像传感器获取的图像数据存在明显的局限性和差异性,所以仅仅利用一种图像数据往往难以满足实际需求。为此,需要通过图像融合技术将不同传感器获取的图像综合起来使用,达到对目标更全面、清晰、准确的理解和认识的目的。而图像配准技术是实现图像融合的重要前提,因此图像配准技术也获得了迅速发展。

本书共 8 章。第 1 章阐述了图像配准的基本概念、分类及发展状况;第 2 章主要介绍医学图像和遥感影像的成像原理及特性;第 3 章详细阐述图像配准中点、线、边缘等特征空间的检测原理及其 Matlab 实现源代码;第 4 章详细介绍平移变换、旋转变换、缩放变换等搜索空间的基本技术及其 Matlab 实现源代码;第 5 章讨论最近邻、双线性、立方卷积、PV 等插值法的实现机制及其 Matlab 源代码;第 6 章详细介绍进退法、黄金分割法、抛物线法、Brent 方法等线性搜索算法和 Powell 算法、遗传算法、蚁群算法等优化算法的主要技术及其 Matlab 编程实现;第 7 章讨论图像配准中相似性度量的相关技术;第 8 章给出了一个多模医学图像配准的实例。此外,在附录中还是以大篇幅详细介绍了本书中使用的工具箱函数及 Matlab 7.0 图像处理工具箱函数,以方便读者查询使用,从而更加有效地应用 Matlab 进行图像配准的研究。

限于作者水平，时间仓促，且随着图像配准技术的不断发展及 Matlab 图像处理工具箱函数的不断更新，书中难免有错误或不妥之处，敬请读者批评指正。

邓显毅

2009 年 2 月于海南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 图像配准原理	1
1.2 图像配准的基本框架	2
1.3 配准方法分类	4
1.4 常用的图像配准技术	6
1.5 图像配准与融合的意义	7
1.6 图像配准与融合技术的应用	9
第 2 章 数字图像	11
2.1 X 线影像	11
2.2 CT 影像	13
2.3 MRI 检查技术	14
2.4 SPECT 成像	16
2.5 PET 成像	17
2.6 超声成像	18
2.7 SPOT 影像	19
第 3 章 特征空间	21
3.1 点检测	21
3.2 线检测	24
3.3 Hough 变换	28
3.4 边缘检测	39
第 4 章 搜索空间	56
4.1 平移变换	57
4.2 旋转变换	61

4.3	缩放变换	69
4.4	综合变换	73
第 5 章	灰度级插值技术	79
5.1	最近邻插值法	80
5.2	双线性插值法	82
5.3	立方卷积插值法	84
5.4	PV 插值法	88
第 6 章	搜索策略	93
6.1	一维搜索算法	93
6.2	Powell 算法	107
6.3	遗传算法	116
6.4	蚁群算法	134
第 7 章	相似性度量	142
7.1	最大互信息测度	142
7.2	AM 测度	153
第 8 章	图像配准实例	157
8.1	配准算法	157
8.2	Matlab 编程实现	158
8.3	程序运行界面及结果	179
附录 A	本书使用的工具箱函数	181
附录 B	Matlab 7.0 图像处理工具箱函数	197
参考文献		233

第1章 绪论

1.1 图像配准原理

1. 数字图像的定义

把 xy 实平面分为网格, 每一网格中心的坐标是笛卡儿积 Z^2 的一对元素, Z^2 是所有有序元素对 (z_i, z_j) 的集合, z_i 和 z_j 是 Z 中的整数。令 (x, y) 为 Z^2 中的整数, f 为把灰度级值 R 赋予每个坐标对 (x, y) 的函数, 则 $f(x, y)$ 就表示一幅数字图像。

若约定原点坐标值 $(x, y) = (1, 1)$, 则 $M \times N$ 的数字图像 $f(x, y)$ 可用矩阵表示为

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1, 1) & f(1, 2) & \cdots & f(1, N) \\ f(2, 1) & f(2, 2) & \cdots & f(2, N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M, 1) & f(M, 2) & \cdots & f(M, N) \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

2. 图像配准的数学定义

数字图像可以用一个二维矩阵表示, 如果用 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 分别表示浮动图像和参考图像在点 (x, y) 处的灰度值, 那么图像 I_1 、 I_2 的配准关系可表示为

$$I_2(x, y) = g(I_1(f(x, y))) \quad (1-2)$$

其中, f 代表二维的几何变换函数; g 表示一维的灰度

变换函数。

配准的主要任务就是寻找最佳的空间变换关系 f 与灰度变换关系 g ，使两幅图像实现最佳对准。由于空间变换是灰度变换的前提，而且有些情况下灰度变换关系的求解并不是必需的，所以寻找空间几何变换关系 f 便成为配准的关键所在，于是式 (1-1) 可改写为更简单的表示形式

$$I_2(x, y) = I_1(f(x, y)) \quad (1-3)$$

1.2 图像配准的基本框架

图像配准的基本框架包括以下四个方面：特征空间、搜索空间、搜索策略和相似性度量。

1. 特征空间

特征空间是指从参考图像和浮动图像中提取的可用于配准的特征。在基于灰度的图像配准方法中，特征空间为图像像素的灰度值；而在基于特征的图像配准方法中，特征空间可以是点、边缘、曲线、曲面、不变矩等。

特征空间的选取对图像配准有着重要的意义，因为特征空间不仅直接关系到图像中的哪些特征对配准算法敏感和哪些特征被匹配，而且大体上决定了配准算法的运行速度和鲁棒性等性能。

理想的特征空间应满足以下几个条件：

- 特征提取简单快捷；
- 特征匹配运算量小；
- 特征数据量合适；
- 不受噪声、光照度等因素影响；

■ 对各种图像均能适用。

2. 搜索空间

搜索空间是指在配准过程中对图像进行变换的范围及变换的方式。

图像的变换范围可以分为三类：全局的、局部的和位移场的。全局变换是指整幅图像的空间变换都可以用相同的变换参数表示。局部变换是指在图像的不同区域可以有不同的变换参数，通常的做法是在区域的关键点位置上进行参数变换，在其他位置上进行插值处理。位移场变换是指对图像中的每一像素点独立地进行参数变换，通常使用一个连续函数来实现优化和约束。

图像的变换方式可以分为线性变换和非线性变换两种形式。线性变换又可以分为刚体变换（Rigid Body Transformation）、仿射变换（Affine Transformation）和投影变换（Projective Transformation）。非线性变换一般使用多项式函数，如二次、三次函数及薄板样条函数，有时也使用指数函数。

3. 相似性度量

相似性度量是衡量每次变换结果优劣的准则，用来对变换结果进行评估，为搜索策略的下一步动作提供依据。

相似性度量和特征空间、搜索空间紧密相关，不同的特征空间往往对应不同的相似性度量；而相似性度量的值将直接决定配准变换的选择，以及判断在当前所取的变换模型下图像是否被正确匹配了。通常配准算法抗干扰的能力是由特征提取和相似性度量共同决定的。

常用的相似性度量有互信息、归一化互信息、联合熵、

相关性、欧氏距离、梯度互相关等。

4. 搜索策略

搜索策略的任务是在搜索空间中找到最优的配准参数，在搜索过程中以相似性度量的值作为判优依据。

由于配准算法往往需要大量的运算，而常规的贪婪搜索法在实践中是无法接受的，因此设计一个有效的搜索策略显得尤为重要。搜索策略将直接关系到配准进程的快慢，而搜索空间和相似性度量也在一定程度上影响了搜索策略的性能。

常用的搜索策略有黄金分割法、Brent 法、抛物线法、三次插值法、Powell 法、遗传算法、蚁群算法、牛顿法、梯度下降法等。

1.3 配准方法分类

1. 按图像的维数分类

按图像空间维数可分为 2D 配准和 3D 配准。2D 配准是指两幅二维空间图像间的配准，3D 配准指两幅三维空间图像间的配准。在空间维数的基础上再加上时间维，则原来的 2D、3D 就分别变成了 3D、4D，在临床医学上可用来观察儿童骨骼发育、跟踪肿瘤变化等。

2. 按交互性分类

按配准过程的交互性可分为人工配准、半自动化配准和全自动化配准。人工配准完全由人工凭借经验进行，输入计算机后实现的只是显示工作，不需要复杂的配准算法；

半自动化配准需要由人工给出一定的初始条件，如人工勾画出轮廓、控制优化参数等；全自动化配准不需人工干预，由计算机自动完成。

3. 按空间变换模型分类

两幅图像之间的空间几何变换函数 f 可用空间变换模型进行描述，空间变换模型可分为刚体变换、仿射变换、投影变换和非线性变换。在图像应用中非线性变换是比较理想的模型，但由于其变换复杂、实现代价大，因此通常采用仿射变换模型实现空间几何变换。

4. 按变换函数作用域分类

根据空间几何变换函数的作用域，配准可分为全局变换和局部变换。全局变换是指将两幅图像之间的空间对应关系用同一个函数表示，大多数图像配准方法采用此变换。局部变换是两幅图像中不同部分的空间对应关系用不同的函数来表示，适用于在图像中存在非刚性形变的情形。通常当全局变换不能满足需求时，需要采用局部变换。

5. 按图像来源和成像部位分类

按照配准图像的来源可分为同一患者的图像配准、不同患者的图像配准和患者与图谱之间的配准。根据成像部位进行分类可分成脑部图像、胸部图像、腹部图像的配准等。

6. 按成像模式分类

按成像的模式不同可分为单模态图像配准和多模态图像配准。单模态图像配准是指浮动的两幅图像是用同一种成像设备获取的，它主要应用于不同 MRI (Magnetic Resonance Image, 磁共振成像) 加权像间的配准、电镜图

像序列的配准、fMRI（功能磁共振成像）图像序列的配准等。多模态图像配准是指浮动的两幅图像来源于不同的成像设备，如 CT（Computed Tomography，计算机 X 线断层扫描）和 MRI 图像的配准。

7. 按控制点分类

可以分为基于外部控制点的配准和基于内部控制点的配准。基于外部控制点的配准在成像前需要在感兴趣的解剖点人工设立标记，只要标记配准了整幅图像也就配准了。基于外部控制点的配准其过程相对简单，不需要复杂的优化算法；缺点是对病人不太友好，设立标记比较复杂，不具回溯性。基于内部控制点的配准在成像前不需要对病人进行特殊处理，配准精度较高，具有回溯性，是目前医学图像配准的研究热点。

8. 按配准过程分类

按配准过程可分为基于特征的图像配准和基于灰度的图像配准。它们的主要区别在于是否包含分割步骤。基于特征的方法包括图像的分割过程，用于提取图像的特征信息，然后对图像的显著特征进行配准。基于灰度的配准方法无需进行图像的分割与特征的提取，直接用图像的统计信息作为配准的相似性度量。

1.4 常用的图像配准技术

基于图像特征的配准方法中，常用的图像特征包括点特征、直线段、边缘、轮廓、闭合区域以及统计矩等。特征提取算法可分为点特征提取算子（如 Harris 算子、

SUSAN 算子)、线特征提取算子(如 LoG 算子、Canny 算子和面特征提取算子,主要通过区域分割)。随着图像分割、边缘检测等技术的发展,基于边缘、轮廓和区域的图像配准方法逐渐成为研究热点。一般来说,基于特征的方法往往具有操作简单、配准速度较快、精度较高等优点,但同时具有需要人工干预、特征点的获取比较困难等缺点。而且通过图像分割等技术来确定图像的特征也存在着较大的问题,因为图像分割的精度和评价标准都没得到很好的解决,并且医生的干预过程会受到操作者的水平和主观因素的影响,给配准结果带来很大的不确定性。

基于灰度的配准方法是直接利用整幅图像的灰度度量两幅图像之间的相似性。然后,采用搜索方法寻找使相似性度量最大或最小值点,从而确定两幅图像之间的变换模型参数。常见的算法有最大互信息法、相关法、条件熵法、联合熵法等。基于灰度的配准方法,只对图像的灰度进行处理,可以避免主观因素的影响,配准结果只依赖于配准方法本身,同时可以避免因图像分割而给配准带来的额外误差,并能实现完全自动的配准。最大互信息法几乎可以用在任何不同模态图像的配准,已广泛应用到多模医学图像的配准中,成为医学图像配准领域的研究热点。但基于灰度的配准方法也存在一些缺点,如计算量大、配准时间长、对缩放旋转和扭曲等较敏感、忽略了图像的空间相关信息等。

1.5 图像配准与融合的意义

随着新型传感器的不断涌现,人们获取图像的能力迅

速提高,不同物理特性的传感器所产生的图像也不断增多。由于不同图像传感器获取的图像数据在几何、光谱、时间和空间分辨率等方面存在明显的局限性和差异性,所以仅仅利用一种图像数据往往难以满足实际需求。为此,可以采用图像融合技术将不同传感器获取的图像综合起来使用,达到对目标有一个更全面、清晰、准确的理解和认识的目的。

多传感器图像融合的基本目标是通过数据组合推导出更多的信息,即利用多个传感器共同或联合操作的优势,克服单个传感器的不定性和局限性,提高传感器系统的有效性。与单传感器图像数据相比,多传感器图像数据所提供的信息具有冗余性、互补性。多传感器图像数据的冗余性是指它们对环境或目标的表示、描述或解释的结果相同。冗余信息是一组由系统中相同或不同类型的传感器所提供的对环境中的同一目标的感知数据。尽管这些数据的表达形式可能存在着差异,但通过变换,可以将它们映射到同一个数据空间。这些变换的结果反映了目标某方面的特征,合理地利用这些冗余信息,可以降低误差和减少整体决策的不确定性,提高识别率和精确度。互补性是指信息来自不同自由度且相互独立,由多个传感器提供的对同一个目标的感知数据。一般来讲,这些数据无论是表现形式还是所表达的含义都存在较大差异,反映了目标的不同特性。对这些互补信息的利用可以提高系统的准确性和结果的可信度。因此把多传感器图像数据各自的优势结合起来加以利用,获得对环境或对象的正确解释是十分重要的。如何把从各种不同传感器得到的图像融合起来,以便更充分地利用这些信息成为图像处理领域重要的研究课题之一。与此同时,各种各样的传感器获取的图像急剧增加,越来越

多的图像数据信息,使得图像数据的处理滞后于图像数据的获取,成为信息处理过程中的薄弱环节。人们对图像信息的分析和利用远远落后于数据源增加的速度,直接影响到图像数据的使用效益。因此,如何充分利用大量的多传感器图像数据成为目前人们所面临的一大难题。

不同传感器或同一传感器在不同时间、不同视点获得的图像在空间上往往会存在差异,因此在图像融合前需要进行图像配准处理,以消除待融合图像间的差异。图像配准是图像融合的重要前提条件,配准精度的高低直接决定融合结果的质量,图像配准是图像融合的关键技术之一。对不同的图像及应用领域,适用的配准方法有可能有很大的差别,根据图像特点和应用角度找出适合的配准方法,是解决图像融合问题的关键。

总之,随着人们对高质量图像的需求和对海量数据实时性的要求越来越高,如何将不同类型图像进行配准和融合就成为一个急需解决的课题,具有重大的使用价值和现实意义。

1.6 图像配准与融合技术的应用

像素级多传感器图像融合通过互补信息的有机集成,可以减少或抑制单一信息对被感知对象或环境解释中可能存在的多义性、不完整性、不确定性和误差,最大限度地利用各种信息源提供的信息,从而大大提高在特征提取、分类、目标识别等方面的有效性。此外,利用多传感器图像的冗余信息,进一步改善信噪比、提高系统的可靠性,降低了对单个传感器的性能要求。图像融合不是简单的叠

加，它产生新的包含更多有价值的信息，即达到 1 加 1 大于 2，甚至远大于 2 的效果。随着图像传感器技术和计算机计算能力的提高，图像配准和融合技术的应用会越来越广泛。

在医学领域，不同模态的图像有各自的特性，如 CT 和 MRI 以较高的空间分辨率提供器官的解剖结构信息，而 PET（Positive Electron Tomography，正电子发射计算机断层扫描）和 SPECT（Emission Computed Tomography，单光子发射断层扫描）以较低的空间分辨率提供器官的新陈代谢功能信息。在实际临床应用中，单一模态图像往往不能提供足够多的信息，一般需要将不同模态图像融合在一起以便得到更全面的信息，为医生正确诊断与治疗打下坚实的基础。2001 年 6 月，GE 公司推出的 Discovery LS 是 PET 与 CT 的一个完美融合系统，具有单体 PET 不能比拟的优势。它可以完成能量衰减校正、分子代谢影像（PET）与计算机 X 线断层扫描（CT）的图像融合，使检查时间大幅度减少。

在遥感领域，大量不同波段的遥感图像融合为更方便、更全面地认识环境和自然资源提供了可能，其成果广泛应用于大地测绘、植被分类与农作物生长势态评估、天气预报、自然灾害检测等方面。1999 年 10 月，由我国和巴西联合研制的“资源一号”卫星发射升空，卫星上安装了我国自行研制的 CCD 相机和红外多光谱扫描仪，这两种航天遥感器之间可进行图像融合，大大扩展了卫星的遥感应用范围。

此外，图像融合技术还大量应用于军事目标的检测、识别与跟踪，集成电路的检测；产品表面测量与检测，无损检测，复杂设备的诊断，交通管制，安检系统，环境监控，智能机器人，网络安全等方面。