

用于医学影像配准的快速框架

杨安荣, 林财兴, 李红强

(上海大学 CIMS 和机器人中心, 上海 200072)

(yanganrong@shu.edu.cn)

摘要: 图像配准是医学影像处理中的一项常见技术, 由于配准操作计算量大, 非常耗时, 因而设计了一种快速配准框架。输入框架的数据包括一幅固定图像和一幅待配准图像(移动图像), 输出数据是包含两张图像差异结果的图像。除了输入和输出数据, 整个框架包括四个组成部分: 插值器、度量器、优化器和变换器。插值器用于测定移动图像映射后像素点的灰度值, 度量器用于评价变换之后的移动图像和固定图像之间的匹配度, 优化器用于优化度量规则, 变换器对目标图像实施各种几何变换处理。这四个组成部分在图像配准操作中分别担任不同的角色, 从而构建出一个简单、快速、稳定的医学影像配准框架。和其他图像配准框架相比, 该框架在结构上更简单, 在配准处理和程序开发方面更快捷, 在实际应用中取得了良好的效果。

关键词: 框架; 图像配准; 互信息; 遗传算法

中图分类号: TP391.41; R445 **文献标志码:** A

New rapid framework for medical images registration

YANG An-rong, LIN Cai-xing, LI Hong-qiang

(CIMS and Robot Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Registration is widely used in medical imaging applications. It is time-consuming due to its huge computation and a new rapid registration framework was presented. The inputting data to the framework include two images: fixed image and moving image. The outputting data were the result image representing the differences between the fixed image and the moving image after registration. Besides the inputting and outputting data, the framework can be divided into four parts: interpolator, measurer, optimizer and transformer. Interpolator was used for evaluating moving image intensities at non-grid positions. Measurer evaluated how well the fixed image was matched by the transformed moving image. Optimizer can optimize the measure criterion and transformer exerted some transformations on the objective image. These four parts acted as different roles in medical images registration and constructed a simple, rapid and stable medical images registration framework. Compared with other registration frameworks, the proposed framework was quite simpler in structure but much quicker in image processing and application development. Good results have been obtained in practical applications.

Key words: framework; image registration; mutual information; Genetic Algorithm (GA)

0 引言

图像配准是指对一幅图像进行一定的几何变换而映射到另一幅图像中, 使两幅图像中相关点达到空间上的一致。图像配准在医学影像处理中得到广泛应用, 近年来出现了各种基于灰度和特征的配准算法^[1-3]。为了更加便捷、系统地解决图像配准问题, 一些配准框架也陆续被提出, 比如普遍学习框架^[4]、适应性过滤框架^[5]和面向对象的框架^[6]等。这些框架能够较好地解决图像配准的某些方面问题, 但都比较复杂, 不太适合程序开发人员基于框架的应用开发。

本文提出了一种可用于常见医学影像处理的快速配准框架, 该框架由四部分组成: 插值器、度量器、优化器和变换器。快速配准框架的结构非常简单, 配准处理快速, 并且提供了便捷的应用程序接口(Application Programming Interface, API), 尤其适合程序员进行基于框架的应用开发。对于普通的医学影像配准操作, 使用快速配准框架可以节约大量的编程工作量从而使快速应用开发(Rapid Application Development,

RAD)得以实现。

1 框架结构

快速配准框架由两幅输入图像、一幅输出图像以及插值器、度量器、优化器和变换器组成, 框架结构如图1所示。

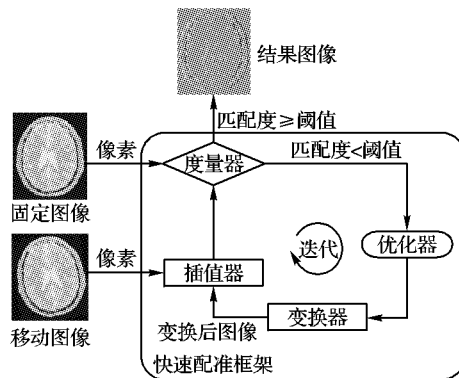


图1 快速配准框架结构

收稿日期:2009-09-14;修回日期:2009-11-10。 基金项目:上海市大学生创业基金资助项目(03060009)。

作者简介: 杨安荣(1975-), 男, 浙江宁波人, 博士研究生, 主要研究方向: 医学影像计算机辅助检测算法及相关工具; 林财兴(1951-), 男, 浙江定海人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 机械制造及其自动化; 李红强(1984-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 医学影像分割和配准。

配准框架的基本输入数据为两幅图像:固定图像 $f(X)$ 和移动图像 $m(X)$,其中 X 代表 n 维空间中的坐标位置。配准过程可以理解为寻找移动图像和固定图像相一致的空间映射的优化问题。输出数据为一幅结果图像 $d(X)$,表示配准之后移动图像和固定图像之间的差异。通过设置匹配度的阈值,就可以评价变换之后的移动图像和固定图像的匹配程度。度量器 $\rho(f, T(m))$ 定义了一种评价匹配度的量化方法,并通过优化器进行优化处理。变换器 $T(X)$ 表示图像上各个点从固定图像空间到移动图像空间上的映射关系, $T(m)$ 即表示针对移动图像的变换处理。插值器用于测定移动图像上的像素点从移动图像空间映射到固定图像空间之后的灰度值。配准问题可以转化为寻找使两幅输入图像(固定图像 f 和移动图像 m)最一致的优化变换方法 T^* ,如式(1)所示:

$$T^* = \arg \max_T \rho(f, T(m)) \quad (1)$$

在配准过程中,度量器通过迭代方式比较固定图像和移动图像对应点的灰度值,直至匹配度达到阈值。如果两幅输入图像之间的差异太大,匹配度可能不会收敛,可以通过设置最大迭代次数来避免。

2 框架原理

2.1 插值器

当移动图像上的一个像素点在经过空间几何变换之后,从一个坐标空间映射到另一个坐标空间时,通常会被映射到非像素网格坐标位置,如图2所示。

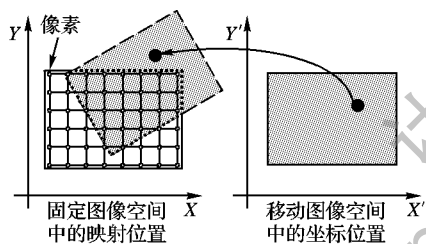


图2 移动图像空间和固定图像空间之间的映射

当移动图像中的所有像素点都被映射到固定图像空间中时,整幅移动图像就被映射到了固定图像空间中,图2的点线框显示了映射之后两幅图像的重叠区域。一般来说,空间变换之后的移动图像的像素点坐标位置不会正好映射到固定图像的对应像素点坐标位置,因此,就需要插值器来测定映射后像素点的灰度值。

在图像配准处理过程中,插值算法会严重影响配准精度和运算时间,即使在一次迭代过程中,插值运算也可能会进行几千次。因此,必须选择合适的插值算法来平衡配准精度和运算时间。在本框架中,考虑到运算效率,只提供两种简单的插值算法,即最邻近点插值(Nearest Neighbor Interpolation, NNI)和线性插值(Linear Interpolation, LI)。

1) 最邻近点插值。选择离映射后像素点坐标位置最近的像素点的灰度值为结果的插值方法。这种方法假设像素点灰度值是分段不变的,运算快速但精度不足。

2) 线性插值。假设像素点灰度值按照线性变化进行插值的方法。这种方法同样运算快速,与最邻近点插值方法相比在某些情况下更加精确。

2.2 度量器

度量器是本框架最重要的组成部分,用来判定移动图像和固定图像之间的匹配度是否达到阈值要求,通过比较移动图像插值处理后像素点灰度值和固定图像对应的像素点灰度

值来实现。

常见的度量方法包括均方法、基数匹配法、归一法和互信息法(Mutual Information, MI)等,通过对这些度量方法的比较,选择互信息法作为快速配准框架的度量方法。

互信息法首先计算固定图像和移动图像之间的互信息,然后测量两幅图像中任意像素点灰度值之间的相关性。互信息法主要的优势是不需要关心图像实际形状之间的关联性,这样就可以对图像之间复杂的映射关系进行建模,从而使互信息法在多模态图像配准中得到了较好应用^[7-8]。

互信息的定义如下:

$$H(A) = - \int p_A(a) \log_{p_A}(a) da \quad (2)$$

其中 $H(A)$ 为事件 A 的熵,同样 $H(B)$ 即为事件 B 的熵。事件 A 和 B 之间的联合熵定义如下:

$$H(A, B) = \int p_{AB}(a, b) \log_{p_{AB}}(a, b) da db \quad (3)$$

式(3)反映的是事件 A 和事件 B 之间的相关性,如果 A 和 B 是完全独立的,则:

$$p_{AB}(a, b) = p_A(a) p_B(b) \quad (4)$$

并且

$$H(A, B) = H(A) + H(B) \quad (5)$$

如果 A 和 B 是相关的,则:

$$H(A, B) < H(A) + H(B) \quad (6)$$

式(5)、式(6)的差异就被定义为事件 A 和事件 B 的互信息,记为: $I(A, B)$,即:

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad (7)$$

互信息法作为一种重要的信息度量方法在医学影像配准中得到了广泛应用,也将其作为本框架度量器的核心算法。

2.3 优化器

优化器是本框架最复杂的一个组成部分。由于图像数据属于非线性模型,非常难以被优化,在处理过程中必须加上约束条件来保证输出结果的合理性和有意义。在每一次迭代处理过程中,优化器设法调整移动图像使其逐步逼近固定图像,以达到优化的目的。

由于采用了互信息法作为度量方法,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是最适合的优化方法,这两种方法已经被证明可以很好地协同工作^[9]。

遗传算法的原理如图3所示,其中 f_{\max} 是目标优化值。

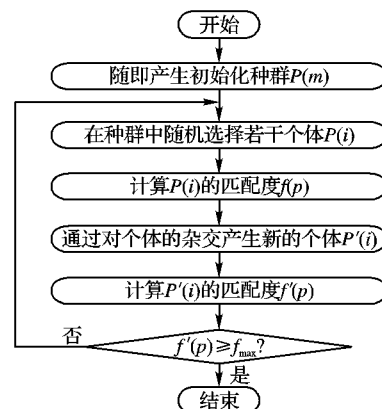


图3 遗传算法过程

遗传算法参照自然界适者生存的原理进行设计,通过对一个确定搜索空间内的随机搜索进行智能优化来解决相关问题^[10]。

将遗传算法作为优化器的核心算法,但其中一个核心问

题是遗传算法的运算量非常大,特别是在目标优化值 f_{\max} 设置很高时。为了保证图像配准的运算速度,通过设置迭代次数来限制运算时间,当迭代次数达到了预设最大值,而匹配度尚未达到目标优化值的情况下,配准过程将自动终止。

2.4 变换器

变换器完成移动图像上的像素点到固定图像空间中的映射,其中包含了各种变换方法,包括简单的平移、旋转、缩放变换以及较为复杂的转置、仿射等变换。由于各种几何变换方法已经非常成熟而且得到较为广泛的应用,在本文中不再展开介绍。本框架变换器中集成了常见的大部分几何变换方法,而且在选择变换方法时始终将运行速度放在第一位。

3 框架实现

本框架是一个轻量级的快速配准框架,非常便于实现。采用面向对象的设计方法对其进行设计并采用 C++ 编程语言进行开发,实现了框架功能。框架主要的类图结构如图 4 所示。

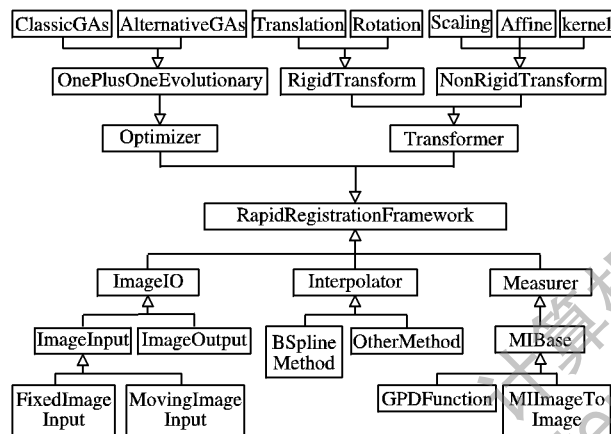


图 4 快速配准框架的类图结构

图 4 显示了快速配准框架的五个主要类:用于图像读取/输出操作的 ImageIO 类,用于插值的 Interpolator 类,用于度量的 Measurer 类、用于优化的 Optimizer 类以及用于几何变换处理的 Transformer 类。每个类又包括各自的子类,并且提供应用程序接口。除了这五个类之外,还包括一些辅助类,比如用于监控框架运行状态的 Monitor 类、用于设置参数的 Parameter 类、用于图像类型转换的 Converter 类等。

由于本框架结构清晰、原理简单,非常便于程序员掌握。在医学影像计算机辅助诊断系统 (Medical Images Computer Aided Diagnosis system, MI-CADs) 项目开发中,快速配准框架是其中的重要部件,承担了大部分图像配准任务。

4 试验结果

采用大小为 256×256 的人体脑部 CT 图像数据在普通 PC 机 (计算机配置: CPU 为 Pentium IV 3.06 GHz, 内存为 1 GB, 硬盘为 160 GB, Windows XP 操作系统, VC++ 2005 开发工具) 环境下对快速配准框架进行了性能测试,测试分成两组,一组为刚性配准,另一组为非刚性配准,并且将测试结果和 ITK 配准框架进行了比对。

4.1 旋转和平移 (刚性配准)

在本例中,移动图像旋转了 10° 并且分别在 X 轴和 Y 轴方向至少平移了 10 mm。配准结果图 5 所示。

整个配准过程可以采用框架中的 Monitor 类进行记录,如

表 1 所示。

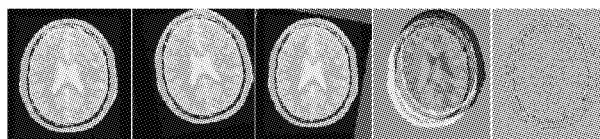


图 5 刚性配准结果示意图

表 1 刚性配准过程记录

迭代次数	旋转角度 /rad	X 轴位移 /mm	Y 轴位移 /mm
1	-0.032 890 4	-12.389 8	-15.875 6
2	-0.043 034 1	-12.489 3	-15.875 2
3	-0.055 443 8	-12.588 3	-15.871 4
4	-0.072 524 8	-12.685 9	-15.883 7
...
19	-0.174 583 0	-12.453 6	-16.073 7
20	-0.174 539 0	-12.455 1	-16.073 4
21	-0.174 475 0	-12.456 6	-16.072 9

总共迭代次数为 21 次,用时 14 s;同样的数据用于 ITK 配准框架迭代次数为 27 次,用时 19 s。

4.2 旋转、平移和变形 (非刚性配准)

在本例中,移动图像旋转了 10° ,分别在 X 轴和 Y 轴方向至少平移了 10 mm 并且图像出现明显变形 (缩小)。配准结果图 6 所示。

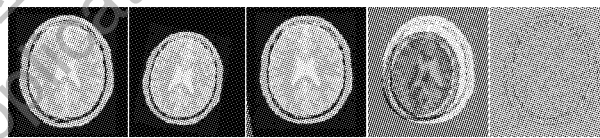


图 6 非刚性配准结果

过程记录如表 2 所示。

表 2 非刚性配准过程记录

迭代次数	X 轴放大	Y 轴放大	旋转角度 /rad	X 轴位移 /mm	Y 轴位移 /mm
1	1.439 309	1.230 918	0.047 485 7	13.514 7	13.078 6
2	1.193 179	1.163 401	0.022 141 7	13.479 5	12.897 9
3	1.243 401	1.187 612	0.171 881 0	13.461 1	12.704 0
4	1.121 416	1.109 991	0.164 544 0	13.455 9	12.790 2
...
17	1.199 864	1.160 021	0.174 153 0	13.126 6	12.747 0
18	1.199 892	1.160 119	0.174 197 0	13.096 2	12.744 6
19	1.199 916	1.160 123	0.174 247 0	13.065 9	12.742 1

总共迭代次数为 19 次,用时 39 s;同样的数据用于 ITK 配准框架迭代次数为 25 次,用时 58 s。

5 结语

本文提出了一种可用于医学影像配准的快速框架,尽管该框架在结构上非常简单,但已经足以胜任大部分常见的配准任务,采用测试数据和真实数据对其进行测试,均取得了令人满意的结果。该框架的主要优点是快速,不仅仅在运算速度方面,还表现在应用开发方面。当然,该框架在配准的适用范围方面还有一些局限性,比如现在还不支持三维变形配准、基于模型的配准等复杂的配准任务,还需要在下一阶段工作中进一步研究。

(下转第 652 页)

2.00 GHz CPU, 512 MB 内存配置的 PC。

图1为本文算法与传统 CamShift 算法对同一段视频进行跟踪处理的结果。可以看到,第23帧中运动目标被前景检测模块检测出来,并被跟踪;第138帧时场景中有与目标颜色特征相似的另一个人(干扰目标)出现,此时它们并未相交,两种方法都能够继续跟踪目标,但是由于传统 CamShift 算法跟踪过程中不改变搜索窗口大小,故不能将目标完全包括在矩形框内,目标位置不够准确;第152帧,干扰目标与真实目标发生了遮挡,可以看到 CamShift 的算法虽然没有跟丢目标,但定位并不准确,将干扰目标包含了进去,容易在后续帧中跟丢目标。而本文的方法一方面联合了颜色和灰度梯度方向特征,另一方面利用联合多特征的加权处理强化了目标和干扰目标的区分度,从而能够更准确地定位目标。

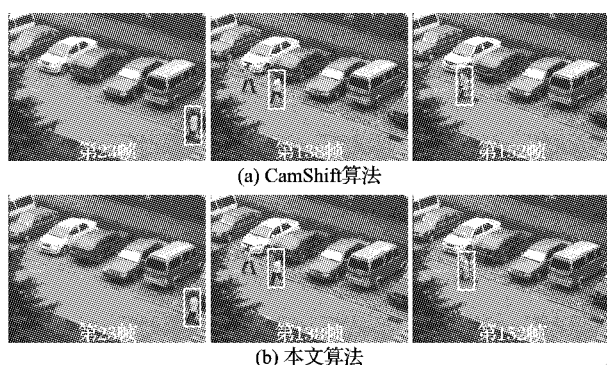


图1 本文算法与 CamShift 算法跟踪效果

另外,在时间消耗上,如表1所示,本文算法虽增加了对目标区域梯度方向特征的计算时间,但由于加强了目标与干扰目标的区分度,使均值漂移公式的迭代次数减小,故在耗时上与传统 CamShift 算法相差不大。与文献[4]所提出改进算法相比,在同样能满足跟踪准确性的前提下,由于本文算法仅采用两个特征作联合,减小了特征的维数,且不需自适应选择最佳特征组合,节省了时间消耗。

4 结语

本文提出的联合多特征的自动 CamShift 目标跟踪算法,

通过自动运动目标检测,并用颜色和灰度梯度方向特征描述目标,对特征的可信度进行加权处理,实现了目标的实时准确跟踪。实验表明,该算法优于传统的 CamShift 算法,并能在有干扰目标存在时正确地跟踪目标,鲁棒性较强。

表1 三种跟踪算法性能比较

算法	平均每帧耗时/s	平均每帧迭代次数
传统 CamShift 算法	0.008 3	2.6
文献[3]的改进算法	0.031 3	3.9
本文算法	0.009 1	2.1

参考文献:

- [1] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 546-577.
- [2] 齐飞, 罗子频, 胡东成. 基于均值漂移的视觉目标跟踪方法综述 [J]. 计算机工程, 2007, 33(21): 24-27.
- [3] STERN H, EFROS B. Adaptive color space switching for face tracking in multi-colored lighting environment [C]// Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 249-254.
- [4] WANG JUN-QIU, YAGI Y. Integrating shape and color features for adaptive real-time object tracking [C]// ROBIO'06: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 1-6.
- [5] YANG TAO, LI S Z, PAN QUAN, et al. Real-time and accurate segmentation of moving objects in dynamic scene [C]// Proceedings of the 2nd International Workshop on Video Surveillance and Sensor Networks. New York: ACM Press, 2004: 136-143.
- [6] COMANICNU D, RAMESH V, MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using Mean Shift [C]// Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 142-149.
- [7] 徐琨, 贺昱曜, 王卫平. 基于 CamShift 的自适应颜色空间目标跟踪算法 [J]. 计算机应用, 2009, 29(3): 757-760.
- [8] 汪沁, 江淑红, 张建秋, 等. 提高 Mean-Shift 跟踪算法性能的方法 [J]. 复旦学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 85-90.

(上接第634页)

参考文献:

- [1] BROWN L G. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.
- [2] MAINTZ B A, VIERGEVER M A. A survey of medical image registration [J]. Medical Image Analysis, 1998, 2(1): 1-36.
- [3] CHRISTENSEN G E, JOHNSON H J. Consistent Image Registration [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(7): 568-582.
- [4] WU GUO-RONG, QI FEI-HU, SHEN DING-GANG. A general learning framework for non-rigid image registration [C]// Proceedings of the 3rd International Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality, LNCS 4091. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 219-227.
- [5] CANER G, TEKALP M A, SHARMA G, et al. Local image registration: An adaptive filtering framework [C]// Proceedings of the SPIE. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 885-888.
- [6] ZHU YANG-MING, COCHOFF S M. An object-oriented framework for medical image registration, fusion, and visualization [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2006, 82(3): 258-267.
- [7] PLUIM J P, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Mutual-information-based registration of medical images: A survey [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8): 986-1004.
- [8] MAES F, COLLIGNON A, MEULEN D, et al. Multi-modality image registration by maximization of mutual information [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187-198.
- [9] BACK T, HAMMEL U, SCHWEFEL H P. Evolutionary computation: Comments on the history and current state [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 3-17.
- [10] CHEN C L, CHANG M H. An enhanced genetic algorithm [C]// Proceedings of the 1993 European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing. Arhen, Germany: [s. n.], 1993: 1105-1109.