



一种利用互信息的多核并行医学图像配准算法

马永军¹, 吴腾华¹, 孙嘉栋², 田婕妤¹

(1. 天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222;

2. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300022)

摘要: 分析了利用互信息作为相似性测度进行医学图像配准的算法,给出了具体计算流程. 针对其中互信息计算量大、耗时长缺点,提出了一种运行于单核多核平台的快速并行配准算法. 利用 OpenMP (open multi-processing) 构建了一个图像匹配的多核并行计算平台,并对配准程序中的互信息计算进行并行处理,最后完成配准. 通过对图像匹配算法效率进行的评估实验,验证了多核并行计算技术能够提高医学图像配准的运行效率. 结果表明,该方法既保证了配准精度,又能够较好解决配准速度慢的问题.

关键词: 医学图像; 快速配准; 并行; 互信息

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2010)06-0062-05

An Algorithm of Multi-Core Parallel Medical Image Registration Using Mutual Information

MA Yong-jun¹, WU Teng-hua¹, SUN Jia-dong², TIAN Jie-yu¹

(1. College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Due to the inferiority of low speed and huge calculation in medical images registration based on mutual information, a fast registration algorithm was discussed. In the image registration process, the algorithm adopts two-step search strategy to target range. An OpenMP based parallel computing platform was built by using multi processor cores, where the parallel processing of the loop in the registration program is on the single-chip double-processor. Experimental results show that the method can solve the problem of low speed, which keep precision of registration.

Keywords: medical image; rapid registration; parallel; mutual information

医学图像配准是使两幅图像中的相关点达到空间上的一致,是目前生物医学工程中研究的热点问题之一^[1]. 图像配准方法一般可以分为基于特征点和基于像素灰度两大类^[2]. 基于特征点的方法根据图像间的共有特征点进行几何配准,该方法原理简单,应用面广. 其缺陷是配准的精度受限于分割精度、特征点位置和数量的选取,对于边界不明确的成像不适宜使用. 基于像素灰度的方法一般利用像素灰度相似性进行配准,不需要对图像做预处理,配准精确度高.

互信息 (mutual information, MI) 算法就是基于像

素灰度的图像配准技术,在配准过程中,由于其根据相似性测度决定代价函数,然后通过搜索技术使代价最小,不需要待配准图像的其他有关先验知识,从而得到非常精确的配准结果,是目前科技工作者研究的热点^[3]. 但该算法与基于特征点的配准算法相比,时间复杂度和空间复杂度高,计算速度缓慢. 本文通过优化搜索方法,并将配准程序在单核多核环境下进行并行化实现,以达到提高运算速度的目的.

并行计算是指同时对多个任务、多条指令或多个数据项进行处理. 当前计算机技术的发展从集中式

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-09-24

基金项目: 天津市科技支撑计划重点资助项目 (08ZCKFGX00600)

作者简介: 马永军 (1970—), 男, 吉林长春人, 教授, 硕士生导师, yjma@tust.edu.cn.

机群到分布式 PC,再向多处理器以及多核的架构发展.因此,并行计算的发展方向也随着计算机技术的发展经历着相应的变化,特别是多核并行计算技术及其应用引起了人们越来越多的重视^[4].OpenMP(open multi-processing)是当前比较有代表性的支持多核处理器的并行计算平台^[5].

本文通过对利用互信息作为相似性测度进行医学图像配准的分析,利用 OpenMP 构建了一个图像匹配的多核并行计算平台,并对配准程序中的互信息计算进行并行处理,最后完成配准.

1 图像配准和互信息

1.1 图像配准原理

医学图像配准包括图像的定位和转换,即通过寻求某种空间变换,使两幅图像的对应点达到空间位置和解剖结构上的完全一致.在医学诊断上,要求配准的结果能使两幅图像上所有的解剖点,或至少是所有具有诊断意义以及手术区域的点都达到匹配.

数字图像可以用二维矩阵表示,如果用 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 分别表示待配准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

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

其中, f 代表二维的空间几何函数.配准的主要任务就是寻找最佳的空间变换关系 f ,使两幅图像实现最佳匹配.

1.2 互信息

互信息理论来源于信息论,是两个随机变量统计相关性的测度.作为不同模态图像配准的相似性度量,互信息不要求待配准图像间存在线性关系.信息论的方法是假设当两幅图像配准时,根据其中一幅图像中某一位置的灰度值能够较好地预测另一幅图像在相应位置的灰度值.若没有配准,则无法预测^[6].

互信息可用“熵”来描述,表达的是一个系统的复杂性或者是不确定性.一幅图像的“熵”反映了该图像中像素灰度的分布情况,灰度级别越多,灰度越分散,“熵”就越大,反映在直方图上就是灰度动态范围应用充分且平坦^[7].

对于两个随机变量 A 、 B ,其概率分布分别为 $p_A(a)$ 、 $p_B(b)$,联合概率分布为 $p_{AB}(a,b)$,则其信息熵及联合熵分别为

$$H(A) = -\sum p_A(a) \log p_A(a) \quad (2)$$

$$H(B) = -\sum p_B(b) \log p_B(b) \quad (3)$$

$$H(A,B) = -\sum p_{AB}(a,b) \log p_{AB}(a,b) \quad (4)$$

互信息定义为

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

2 基于互信息的图像配准算法

2.1 利用互信息的相似性测度

待配准的两幅图像可认为是关于灰度的随机变量集 A 和 B , a 、 b 是图像的像素灰度值.其概率分布可通过归一化两幅图像的联合灰度直方图 $h(a,b)$ 得到:

$$p_{AB}(a,b) = \frac{h(a,b)}{\sum_{a \in A, b \in B} h(a,b)} \quad (6)$$

$$p_A(a) = \sum_{b \in B} p_{AB}(a,b) \quad (7)$$

$$p_B(b) = \sum_{a \in A} p_{AB}(a,b) \quad (8)$$

因此,互信息可以定义为

$$I(A,B) = H(A) + H(B) - H(A,B) = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} p_{AB}(a,b) \log \frac{p_{AB}(a,b)}{p_A(a)p_B(b)} \quad (9)$$

它是两幅图像的边缘熵的和与联合熵的差,在最小化联合熵的基础上,又充分地兼顾了图像的内容,灰度值的互信息最大.

2.2 归一化互信息

尽管互信息测度成功地应用于医学图像配准中,但由于互信息与两个图像重叠部分的多少成正比,两幅图像重叠部分的大小对互信息的度量有很大影响,重叠部分减小,参与统计互信息的像素个数减小会导致互信息值减小.其次,误配的像素数量增加可能导致互信息值增大.因此互信息值达到最大并不能保证得到正确的配准结果.

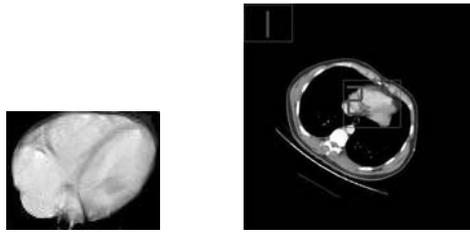
归一化互信息测度的提出解决了这个问题^[8],使目标函数能更加准确反映互信息量和配准参数之间的关系,即:

$$NMI(A,B) = (H(A) + H(B)) / H(A,B) \quad (10)$$

配准后,两副图像的相似性度量可采用归一化互信息进行度量,即归一化互信息值越大,配准效果越好.

2.3 图像配准算法

对于待配准图像中目标区域的搜索如图 1 所示.使用图像的全部灰度信息作为特征空间.根据目标图像可以得出待配准图像中搜索区域的大小,如图 1(b) 中所示区域.通过对目标图像的旋转、将搜索区域按像素平移,并且计算每一次搜索后的目标区域的归一化互信息值,其中互信息值最大的区域就是要找的配准结果,如图 1(b) 中的区域 2.



(a) 目标图像 (b) 待配准图像

图1 待配准图像的区域搜索

Fig.1 Regional search for source image

图像配准算法如下:

- (1) 目标图像和待配准图像初始化定位;
- (2) 计算当前搜索位置的互信息;
- (3) 计算归一化互信息;

(4) 如果目标图像未旋转完 1 周,将目标图像旋转一定角度,转(2),继续计算互信息;如果目标图像已经旋转完 1 周,但是目标图像未到达待配准图像的右边界,平移至下一位置,转(2);如果已经到达待配准图像的右边界,则结束搜索。

根据配准的基本过程,在对目标区域进行搜索时,对搜索的区域需要计算灰度直方图与信息熵,并与目标图像一起计算归一化互信息,互信息的计算量本身就大,而这一过程又被反复调用,所以互信息在整个配准过程中计算量最大,需进行算法优化,以提高计算效率。而利用多核平台进行并行计算就是一个非常好的选择。

3 单机多核环境下的并行化处理

3.1 多核并行处理技术简述

最近几年,Intel 和 AMD 公司都推出了用于个人计算机的多核 CPU。多核处理器将多个执行核嵌入到同一个处理器芯片内,这些核是相互独立的处理器,它们可以共享或单独拥有自己的缓存,同时共享一个主存,每个指令都具有一个完整的硬件执行环境,线程间实现了真正意义上的并行。

以双核为例,如果程序中只有两个处理任务,芯片中的每个 CPU 核运行一个任务,不需要进行时间分片,两个任务做到真正的同时并行运行,从而大大提高了运算效率,特别适合图像处理等大容量并行数据处理的应用^[5]。

多核编程需要 OpenMP 支持,OpenMP 应用程序接口是针对共享内存多处理器体系结构的可移植并行编程模型,能够支持并行计算时对线程和变量的灵活设置和控制,适合多核 CPU 上的并行程序设计^[9]。

3.2 利用 OpenMP 的并行算法

简单的方法是直接用开发工具 VC2005 提供的配置完成。需要将项目属性对话框中“语言”项改为支持 OpenMP。这种方法虽然简单,但只支持标准的 fork/join 并行模式,即程序中的串行部分都由主线程执行,并行的部分是通过派生其他线程来执行。当并行部分没有结束时,是不会执行串行部分的。因此,为了让程序运行更加有效率,必须手工调用 OpenMP 指令,分配各线程的并行运行方式。

本文所述的快速配准算法共 4 个步骤,分别对应了 4 个线程,其中的“计算互信息”线程计算量最大,占总时间的 70%左右。可以将计算任务量平均分配到两个核上,尽量让两个核的计算任务平衡,即使负载均衡。两个内核完成计算后,将数据放入共享内存,供随后直接读取,以进行配准计算。

这样,借助于 OpenMP 的支持,在双核平台上对医学图像的配准串程序进行并行化处理。将搜索区域的平移、互信息的计算过程同时在多处理器上执行,以达到优化配准算法的目的。

3.3 互信息计算的并行算法

通过在互信息计算算法中增加 OpenMP 编译器指令实现算法的并行化。以计算互信息 NMI (程序中定义为 $dbNMI$)的 4 重循环程序为例进行说明。其中,图像 1 的高宽为 $w1, h1$; 图像 2 的高宽为 $w2, h2$ 。

串行化程序为

```

dbNMI = 0.0;
for(j = 0; j < h1 - h2 + 1; j++)
  {for(i = 0; i < w1 - w2 + 1; i++)
    { /*循环 1: 对图像进行平移和旋转 */
      for(n = 0; n < h1; n++)
        {for(m = 0; m < m1; m++)
          { /*循环 2: 计算当前位置和角度下的互信息 */
            }
          }
        }
    }
  }

```

由于程序中对各个像素点的计算相互独立,循环 1 处的代码不存在循环依赖关系,因此只需要简单应用带 parallel 参数和 for 参数的编译器指令即可。需要注意的是对变量的定义,在并行化后 OpenMP 会把 parallel 的范围以外声明的变量当成是所有线程共用。因此 i, j, m 和 n 要在 parallel 的范围内进行声明,否则多个线程可能会同时对 i, n 和 m 进行自加的修改操作,导致循环次数比预期的少。而 dbNMI 要在 parallel 的范围以外声明,否则在循环 1、2 处计算得

到的值不能正确反映所有线程对 dbNMI 值的影响. 并行化处理后的程序为

```

double dbNMI = 0.0;
#pragma omp parallel for num_threads(2)
for(int j = 0; j < h1-h2 + 1; j + +)
{for(int i = 0; i < w1-w2 + 1; i + +)
    /* 循环 1: 对图像进行平移和旋转 */
    for(int n = 0; n < h1; n + +)
        {for(int m = 0; m < w1; m + +)
            /*循环 2: 计算当前位置和角度
            下的互信息 */}
        }
    }
}

```

在预编译指令中指明计算所需的多线程数目为 2. 如不指定线程数目, 在缺省情况下 OpenMP 也会为双核计算会自动分配 2 个线程完成计算任务.

4 配准实验

4.1 实验结果

对胸腔 CT 图进行配准实验, 目标图像为心脏区域, 实验的相似度测量均采用归一化互信息进行度量, 即归一化互信息值越大, 配准效果越好.

采用不同方法的实验结果如图 2 所示, 其中目标图像为 90 像素×70 像素, 待配准图像为 353 像素×353 像素. 图 2(c)为常规互信息配准结果, 图 2(d)为采用并行化处理后的配准结果. 所得归一化互信息 (NMI) 均在 1.4 左右. 显然, 这两种方法在配准精度上没有明显差异.

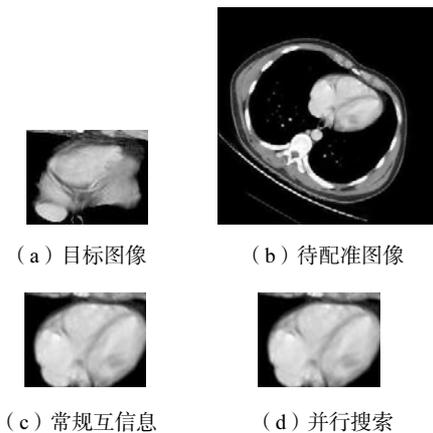


图 2 配准结果比较

Fig.2 Comparison of registration results

配准程序在 CPU 为双核 Core2 E7400 处理器, 主频 2.8 GHz, 内存 2 G 的 PC 机上运行, 以 VC2005

为运行环境. 将快速配准算法应用到双核环境下, 算法经并行化处理后的系统利用率如图 3 所示.



(a) 串行程序运行



(b) 并行程序运行

图 3 系统利用率比较

Fig.3 Comparison of system utilization

图 3(a)为常规串程序的系统运行情况, 此时两个 CPU 使用率并不相同, 且总利用率为 75%左右; 运行并行程序时, 两个 CPU 使用效率相当, 且总利用率在运行程序时多数时间保持在 100%, 证明并行化的程序可以充分使用双核的计算性能, 最大限度的发挥单机多处理器的计算能力.

常规互信息法配准, 程序运行时间为 1 899 s, 达到最好配准效果(即: 归一化互信息 $NMI = 1.4075$). 并行算法仅用 219 s 就达到了这样的配准效果.

4.2 性能分析

为测试程序的运行效率, 实验中测试了 6 组不同尺寸的目标图像和待配准图像. 程序运行效率见表 1. 运行时间是算法在计算机上求解一个问题所需的时间, 即算法开始执行到执行结束的时间. 加速比是最传统的并行算法评价标准, 体现了在多核并行机上运用并行算法求解实际问题所能获得的好处. 并行算法的加速比定义为

$$S_p = T_s / T_p \tag{11}$$

式中: T_s 为最优串行算法在单处理器上的运行时间; T_p 为并行算法在多处理器计算机上充分使用多核性能时的程序运行时间^[10].

由实验数据可以看出, 无论串行和并行算法, 运行时间是和数据规模(图像大小)成正比的. 即待配准图像和目标图像越大, 运行时间越长. 本文设计的快速并行算法和一般的串行算法相比较, 在计算性能和 CPU 的利用率上都有明显的提高. 并行程序在执行中, 加速比比较稳定, 只是随着数据规模的加大而

略有下降. 且运行并行程序过程中,CPU 一直处于满负荷工作状态.

表 1 程序运行效率分析
Tab.1 Efficiency of program runing analysis

数据规模/像素		配准运行时间/s		S_p
待配准图像	目标图像	T_s	T_p	
128×128	45×36	193.60	23.37	8.28
179×179	45×36	449.82	57.66	7.80
256×256	90×70	838.72	115.12	7.29
353×353	90×70	1 899.11	219.77	8.64
512×512	175×135	4 194.03	605.67	6.92
703×703	175×135	10 220.99	1 453.91	7.03

5 结 语

通过对基于互信息的医学图像配准原理和算法的分析,本文提出了一种利用互信息的医学图像并行配准算法. 利用 OpenMP 构建了一个图像匹配评估的多核并行计算平台,在单机双核环境下对配准程序中的循环迭代进行并行处理,最后完成配准. 进行了对图像匹配算法效率的评估实验. 实验表明,该方法在保证了配准精度的同时,大大提高了配准速度. 本算法能够较好地完成配准过程,但医学图像的配准并无所谓的“金标准”,因此在医学临床的诊断应用中,算法效率还需在实践中不断改进,以更好地满足生物医学工程中多模态图像配准的应用.

参考文献:

[1] 隋美蓉,胡俊峰,唐鹤云,等. 医学图像配准方法及其应

用[J]. 临床医学工程,2009,16(5):96-97.

[2] 彭文,童若锋,钱归平,等. 使用特征点与灰度值的医学图像局部配准方法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(5):944-950.

[3] 陈伟卿,李冠华,欧宗瑛,等. 基于灰度互信息和梯度相似性的医学图像配准及其加速处理[J]. 智能系统学报,2008,3(6):498-503.

[4] Gorder P F. Multicore processors for science and engineering [J]. Computing in Science and Engineering, 2007,9(2):3-7.

[5] Terboven C,Dieter M,Schmidl D. First Experiences with Intel Cluster OpenMP[C]// Proceedings of 4th International Workshop on OpenMP. Heidelberg : Springer Verlag,2008:48-59.

[6] 吕焯,段会川. 基于 Harris 角点和最大互信息的多模医学图像配准[J]. 计算机工程与设计,2008,29(4):998-1000.

[7] 杜俊俐,邱道尹,朱齐亮,等. 医学图像配准中的一种互信息快速计算方法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(22):180-188.

[8] Studholme C,Hill D L G,Hawkes D J. Overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment[J]. Pattern Recognition,1999,32(1):71-86.

[9] Rasmussen M S,Stuart M B,Karlsson S. Parallelism and scalability in an image processing application[J]. International Journal of Parallel Programming, 2009,37(3):306-323.

[10] Akhter S,Roberts J. 多核程序设计技术[M]. 李宝峰,富弘毅,李韬,译. 北京:电子工业出版社,2007.