

基于配对堆的交互式医学图像分割算法的研究

党建武 杜晓刚 王阳萍

(兰州交通大学电子与信息工程学院 兰州 730070)

摘要 在序列医学图像的交互式分割过程中,分割速度是交互式算法应用的一个瓶颈。提出了一种基于配对堆的交互式医学图像分割算法。通过使用配对堆实现可降级的优先队列,降低了 Live-Wire 交互式分割算法从图上大量节点中动态搜索两目标点之间最短路径的时间复杂度。经算法分析以及在放疗计划系统中的应用实验表明,该算法可有效提高序列医学图像的分割效率。

关键词 医学图像, Live-Wire 算法, 交互式分割, 配对堆

中图分类号 TP301.6 文献标识码 A

Research of Interactive Medical Image Segmentation Algorithm Based on Paring Heap

DANG Jian-wu DU Xiao-gang WANG Yang-ping

(School of Electronics & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract The segmentation speed is a bottleneck of application of interactive algorithm in the interactive segmentation of serial medical images. This paper provided an interactive medical image segmentation algorithm based on pairing heap. The time complexity of procedure of searching the shortest path dynamically of Live-Wire was decreased by paring heap implementing degradable prior-queue. Algorithm analysis and experiment in radiation therapy plan system indicate that the algorithm can improve the segmentation efficiency of serial medical images.

Keywords Medical image, Live-Wire algorithm, Interactive segmentation, Paring heap

1 引言

医学图像分割是医生根据需把感兴趣的目标区域(靶区、重要组织和器官等)从背景中分离出来的过程。它是对靶区和重要组织进行三维重建和定量分析等后续操作的基础,其分割结果的准确性对医生诊断病情并做出正确的医疗计划起到了重要作用。交互式分割是把计算机强大的数据处理、存贮和记忆功能与人的知识经验结合起来,以人机交互的形式完成图像分割的过程。交互式分割算法能够将医生的经验融入分割过程中,且算法具有高精度、可重复性等特点,因而目前被广泛应用于医学图像可视化分析^[1,2]以及放疗计划软件系统中^[3]。

在根据二维医学影像图像进行医学影像分析以及制定放疗计划之前,需要上百张图像勾画靶区和重要器官,其勾画工作量大,因此对算法的运行效率提出了更高的要求。Live-Wire 算法是一种精确的、可重现的交互式医学图像分割算法^[4],采用 Live-Wire 算法进行图像分割时,当人工选定起始点与目标点后,算法会自动搜索两点间的最短路径作为边界。由于 Live-Wire 算法中搜索最短路径过程通常采用 Dijkstra 算法^[1],其时间复杂度为 $O(n^2)$,为了提高算法动态搜索最短路径过程的运行效率,本文提出了一种基于配对堆的交互式医学图像分割算法。通过使用配对堆^[5]实现了可降级的优先

队列,把 Live-Wire 算法在动态搜索最短路径过程中的时间复杂度降为 $O(n \log n)$,从而提高了算法在动态搜索最短路径时的运行效率,有效地缩短了制定放射治疗计划前期对医学图像序列进行分割的时间。

2 Live-Wire 交互式图像分割算法

Live-Wire 算法的基本思想^[6,7]是把预分割的图像当成一个连通图,图像中的像素当作图中的节点,相邻像素点之间的边当作连接节点的边。在每一个边上定义一个代价函数,给强边缘赋予较小的代价值,非强边缘赋予较大的代价值,同时相邻像素间的弧赋 0 代价,而非邻接像素间的弧赋 $+\infty$ 代价,把分割转化为起始点到目标点之间的最优路径问题,然后通过图搜索来寻找目标边界,把指定两点间的最短路径当作目标的边界。

2.1 构造代价函数

为了保证得到的最短路径能准确地表示目标的边缘, Live-Wire 算法构造了如下的代价函数^[4]:

$$l(p, q) = \omega_G \times f_G(q) + \omega_Z \times f_Z(q) + \omega_D \times f_D(q) \quad (1)$$

式中, $l(p, q)$ 代表 p 到其邻接像素 q 的局部代价; $\omega_G, \omega_Z, \omega_D$ 代表加权系数; $f_G(q), f_Z(q), f_D(q)$ 分别代表对应像素 q 处的梯度特征函数、Laplace 过零特征函数和光滑度约束函数。

到稿日期:2008-12-24 返修日期:2009-03-07 本文受国家 863 高技术研究发展计划基金项目(2006AA02Z499),甘肃省科技攻关计划项目(0708GKCA047)和甘肃省自然科学基金项目(0803RJZA015)资助。

党建武(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息处理, E-mail: dangjw@mail.lzjtu.cn; 杜晓刚(1985-),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理; 王阳萍(1973-),女,博士生,主要研究方向为医学图像处理。

$$f_G(q) = 1 - \frac{G(q)}{\max(G)} \quad (2)$$

$$f_z(q) = \begin{cases} 0 & L(q) = 0 \\ 1 & L(q) \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f_D(q) = \frac{2}{3\pi} \{ \cos[D(p) \cdot |p-q|]^{-1} + \cos[D(q) \cdot |p-q|]^{-1} \} \quad (4)$$

式中, $G(q)$ 和 $L(q)$ 分别给出像素 q 处的梯度的幅值和 Laplace 值; $D(\cdot)$ 代表图像中某点梯度的单位法向量, 这样, 对 $\forall p, q$ 有 $0 \leq l(p, q) \leq 1$ 。

2.2 图搜索产生最优路径

Live-Wire 算法在动态规划搜索最短路径的过程中通常使用 Dijkstra 算法。其基本思想^[5,8]是把图中顶点集合 V 分为两组, 第一组为已求出最短路径的顶点集合(用 S 表示), 第二组为其余未确定最短路径的顶点集合(用 U 表示), 按最短路径长度递增的次序依次把第二组的顶点加入 S 中。在加入的过程中, 总保持从源点 v 到 S 中各顶点的最短路径长度不大于从源点 v 到 U 的任何顶点的最短路径长度。此外, 每个顶点对应的最短路径长度不大于从源点 v 到此顶点的最短路径长度, U 中的顶点的距离为从 v 到此顶点只包括 S 中的顶点为中心顶点的当前最短路径长度。Dijkstra 算法搜索连通图中两点间最短路径的过程如图 1 所示。

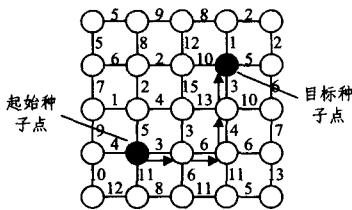


图 1 两点间最短路径示例

3 基于配对堆的交互式分割算法

Live-Wire 算法在动态寻优过程中通常采用 Dijkstra 算法。然而传统的 Dijkstra 算法在运行时要执行两重嵌套的循环结构, 其算法的时间复杂度为 $O(n^2)$, 运行效率较低。由于在制定放疗计划时要勾画的图像张数多, Live-Wire 算法要处理的医学图像通常为 512×512 或 1024×1024 的 CT 或 MRI 图像序列, 因此要求算法具有较快的运行效率。本文通过使用高级数据结构配对堆实现了可降级的优先队列, 把 Live-Wire 算法动态寻优过程的时间复杂度从 $O(n^2)$ 降低为 $O(n \log n)$, 从而提高了交互式分割算法在动态搜索最短路径过程中的运行效率, 缩短了制定放射治疗计划的时间。

3.1 配对堆结构

配对堆是由配对堆节点组成的一种高级数据结构。每个堆节点除了用于排序的元素外, 还包括前驱节点、左儿子节点、右兄弟节点 3 个指针域。为了支持“降级”操作, 作为最左儿子节点的前驱节点指针将指向其父亲节点; 否则这个节点就是一个右兄弟节点, 其前驱节点指针将指向这个节点的左兄弟。配对堆有 3 条性质: 根节点具有整个堆最小值元素(针对最小值配对堆而言); 任何一个堆节点的元素值均小于等于其左儿子节点; 同一层次串联的兄弟没有大小顺序, 但是均大于最左兄弟的父节点。配对堆结构的 3 个性质决定了使用其能实现可降级的优先队列。

3.2 基于配对堆的交互式分割算法动态寻优过程

因为修改堆的操作均由直接操作堆节点指针完成, 所以

使用堆结构实现优先队列的最大问题是需要知道已访问的图节点对应的堆节点指针。因此, 采用一种图节点与堆节点之间的快速访问方式显得十分必要。为了保证算法的执行效率和避免浪费内存空间, 当算法遍历到图节点时动态生成与其对应的堆节点。其中, 在堆节点中保存了对应的图节点, 以及图节点代价等相关信息。另外, 再以一个变量保存配对堆的根节点, 以便于每次取出权值最小的节点。图节点与配对堆节点的对应关系如图 2 所示。在算法解出最短路径后, 遍历图节点并释放在动态生成堆节点时申请的内存空间。

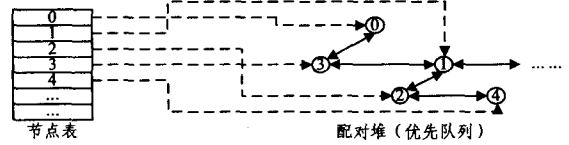


图 2 图节点和配对堆节点的对应关系

基于配对堆的交互式医学图像分割算法动态寻优过程:

- (1) 置搜索结束标志 $Flag = FALSE$, 选取分割时的第一个种子点作为源种子点, 并输入其基本信息;
- (2) 生成与源种子点对应的配对堆节点作为配对堆的根节点, 并添加源种子点和该配对堆节点的关联指针;
- (3) 取出配对堆的根节点信息, 判断是否到达目的种子点, 若达到目的种子点, 则转入(7);

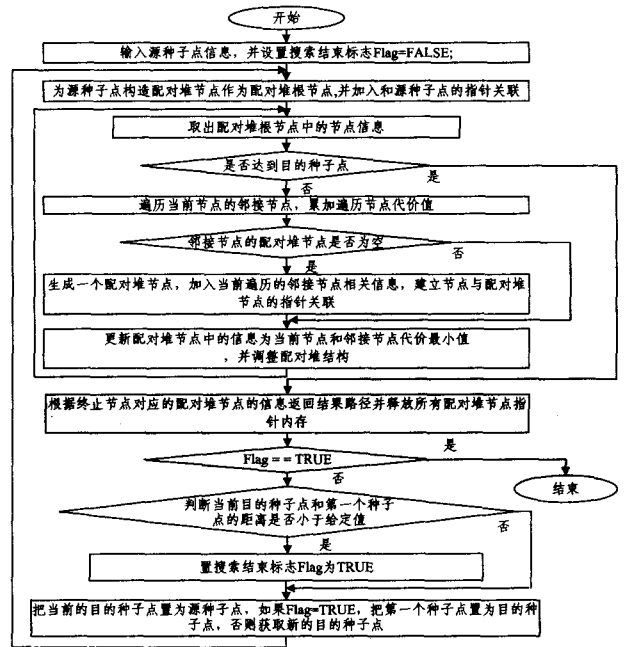


图 3 基于配对堆的交互式分割算法动态寻优过程

- (4) 依次遍历当前节点的其他邻接节点, 并累加遍历节点的代价值;
- (5) 判断邻接节点的配对堆节点是否为空, 若为空, 则为该邻接节点生成一个配对堆节点, 加入当前遍历的邻接节点的相关信息, 并建立该邻接节点与配对堆节点的关联指针;
- (6) 用当前节点代价和邻接节点代价的最小值更新配对堆节点中的信息, 并采用配对堆的基本操作调整配对堆结构, 然后再返回到(3);
- (7) 根据目的种子点对应的配对堆节点的信息返回最短路径作为源种子点和目的种子点之间的分割边界, 并收回所有配对堆节点的指针内存空间;
- (8) 检查搜索结束标志 $Flag$, 如果 $Flag = TRUE$, 结束搜索, 否则顺序执行;

(9)判断当前目的种子点和第一个种子点的距离小于给定值 ϵ 时,置搜索结束标志 Flag 为 TRUE;

(10)把当前的目的种子点置为源种子点,如果 Flag = TRUE,把第一个种子点置为目的种子点,否则获取新的目的种子点,转(2)执行。

基于配对堆的交互式分割算法动态寻优过程的流程如图 3 所示。

3.3 算法性能分析

基于配对堆的交互式医学图像分割算法动态寻优过程的时间复杂度主要由配对堆的基本操作决定。其中“合并”、“插入”和“降级”3种操作均在常量时间内完成,其时间复杂度是 $O(1)$ 。“删除最小”操作的最坏情况是根节点具有 $n-1$ 个儿子节点,因此“删除最小”操作的最坏时间复杂度是 $O(n)$ 。采用“两趟合并法”需要对所有儿子节点进行“合并”操作,能够有效减少同一层次的兄弟节点数,因此降低了最坏情况的发生机率。文献[9]指出了配对堆能够达到与斐波那契堆相同的摊还时间复杂度 $O(\log n)$,因此对于边数为 E 、节点数为 V 的有权图,基于配对堆的交互式医学图像分割算法动态寻优过程的时间复杂度为 $O(E+V\log V)$,即为 $O(n\log n)$,与传统的 Live-Wire 算法动态寻优过程的时间复杂度 $O(n^2)$ 相比有了显著的提高。

4 实验结果

为了验证算法的可行性与有效性,采用 vc++6.0 编程实现了 Live-Wire 交互式分割算法以及本文提出的基于配对堆改进动态寻优过程的交互式分割算法,并利用兰州军区总医院提供的病人医学影像图像片做了大量的实验。在配置为 Winxp sp2, Pentium 2.4G, 1G DDR2 的 PC 机上,对一张 512×512 的原始 CT 图像构造代价函数后转化成具有 512×512 个顶点的带权无向图,然后交互选择种子点,再通过本文提出的动态寻优算法搜索源种子点和目的种子点间最短路径,直至形成封闭的分割区域,实验结果如图 4 所示。



图 4 交互式分割算法分割示例

其中,图 4(a)为一张人体胸部的原始 CT 图片。图 4(b)为用传统的 Live-Wire 算法勾画胸部空腔后的结果。图 4(c)为用基于配对堆改进的交互式分割算法勾画胸部空腔后的结果。图中勾画边界上的点为种子点。图 4(d)为对 10 张 512×512 的原始 CT 图片序列采用配对堆改进的交互式算法进行分割,并将分割出的区域进行三维重建后的结果。在图 4(b)和图 4(c)中,在相同位置均取 10 个种子点,在不计人工交互取点耗费时间的情况下,传统的 Live-Wire 算法在该图上完成区域勾画过程中,顺序搜索完成所有种子点间最短路径需

要 2870ms,基于配对堆的交互式分割算法在该图上完成区域勾画过程中,顺序搜索完成所有种子点间最短路径需要 667ms。图 5 为重离子放射治疗计划软件系统图像分割模块的实现界面。实验表明,采用配对堆改进的交互式分割算法有更快的运行效率,缩短了制定放射治疗计划时对医学图像序列进行交互式分割的时间。

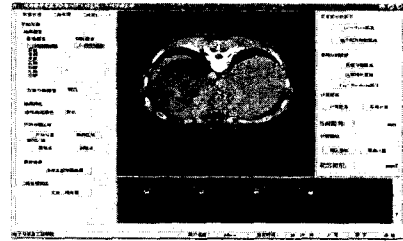


图 5 放射治疗计划系统图像分割模块的实现界面

结束语 本文针对 Live-Wire 交互式分割算法在动态搜索最短路径过程中效率低下的问题,提出了一种基于配对堆的交互式医学图像分割算法。在动态寻优过程中通过使用配对堆结构实现了可降级的优先队列,把 Live-Wire 算法动态寻优过程的时间复杂度由 $O(n^2)$ 降低为 $O(n\log n)$,从而提高了交互式分割算法在搜索最短路径过程中的运行效率,缩短了制定放射治疗计划前期对医学图像序列进行分割的时间。

参考文献

- [1] 高新波,雷云,姬红兵.一种改进的 Live-Wire 交互式图像分割算[J].系统工程与电子技术,2003,25(8):915-918
- [2] 罗希平,田捷.一种改进的交互式医学图像序列分割方法[J].电子学报,2003,31(1):29-32
- [3] Dang Jianwu, Wang Yangping, Li Sha, et al. Heavy-ion Radiotherapy Treatment Planning System and Medical Image Processing Algorithm Used in It[C]// IEEE CASE2008. USA, Aug. 2008
- [4] William B A, Eric M N. Fast, Accurate, and Reproducible Live-Wire Boundary Extraction[C]// Proceeding of the 4th International Conference on Visualization in Biomedical Computing. Hamburg, Germany, 1996
- [5] Weiss M A. Data Structures and Algorithm Analysis in C (Second Edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 372-376
- [6] Falcao A X, Udupa J K, Samarasekera S, et al. Usersteered image segmentation paradigms: live wire and live lane [J]. Graphic models and Image Processing, 1998, 60: 233-260
- [7] 田捷,赵明昌,何晖光.集成化医学影像算法平台理论与实践[M].北京:清华大学出版社,2004
- [8] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms, Second Edition [M]. The MIT Press, 2001
- [9] Stasko J T, Vitter J S. Pairing heaps: experiments and analysis [J]. Communications of the ACM, 1987, 30(3): 234-249

(上接第 265 页)

- [9] 蒲浩,宋占峰,詹振炎.基于 Delaunay 三角网数字地面模型的路线三维建模方法[J].铁道学报,2001,23(4):81-87
- [10] 王晨昊.地理环境建模关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.12
- [11] Intel. Dynamic Terrain Modification Using A Correction Algorithm[OL]. 2006. http://www.andesengineering.com/Pro-

- jects/TDS/Docs/Dynamic_Terrain_IMAGE_2006.pdf, 2008-5-27
- [12] 宋汉辰,魏迎梅,吴玲达.三维对象模型与地形的匹配方法研究[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(9):1167-1171
- [13] 蒲浩,宋占峰,詹振炎.一种快速的逐点插入算法构建 DTM[J].铁路计算机应用,2001,10(9):27-30
- [14] Philip J, David H. 计算机图形学几何工具算法详解[M].周长发,译.北京:电子工业出版社,2005