

局部心血管计算机断层扫描提取算法在 病灶辅助诊断中的研究与实现

任国印¹, 吕晓琪¹, 杨楠², 喻大华¹

¹内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010;

²包头医学院外语系, 内蒙古 包头 014010

摘要 为了在影像学检查中实时交互地提取病灶血管的四维计算机断层扫描(CT)影像,提出了一种思维进化算法(MEA)优化的并行区域生长算法;MEA优化的基于三级线程处理队列的并行区域生长算法能够通过自我进化避免局部最优,提高了收敛速度和血管分割精度,借助可视化工具包(VTK)和计算机图形图像类库,实现交互式心脏CT局部任意血管病灶的提取和四维可视化。结果表明:局部感兴趣血管10个时相的提取时间大大缩短,体绘制速度大幅提升,局部血管提取数据的每秒帧数(FPS)可达到30左右,如果在显示过程中有旋转、缩小、放大等交互操作,会使数据的FPS减至21左右,但仍能满足心血管的实时显示;借助优化算法实现心肌局部血管区域的提取,能辅助医生观察病人心血管疾病的病灶区域,可为诊断心血管疾病提供直观、有效的可视化依据。

关键词 图像处理; 并行区域生长算法; 思维进化算法; 心血管系统; 感兴趣区域提取; 四维可视化

中图分类号 R445.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051701

Research and Realization of Local Cardiovascular Computed Tomography Extraction Algorithm in Lesion Assisted Diagnosis

Ren Guoyin¹, Lü Xiaoqi¹, Yang Nan², Yu Dahua¹

¹ School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

² Foreign Language Department, Baotou Medical College, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

Abstract To extract four-dimensional computed tomography (CT) images of lesion blood vessels with real-time interaction in imaging examination, we propose a parallel region growing algorithm with optimized mind evolutionary algorithm (MEA). The parallel region growing algorithm with optimized MEA based on the three-level thread processing queue can avoid local optimum through self-evolution, and can improve convergence speed and blood vessel segmentation accuracy. Any part of the interactive cardiac lesion vascular extraction and four-dimensional visualization can be achieved with the aids of the visualization toolkit (VTK) and computer graphics library. The results show that extraction time and volume rendering velocity with ten phases of local blood vessels of interest are significantly improved, and frames per second (FPS) of local blood vessel extraction can reach about 30. If interactive manipulations such as rotation, shrinkage, and enlargement appear in the display process, the FPS will decrease to about 21, but the real-time display of cardiovascular can be obtained successfully. The local cardiovascular regional extraction technique can assist doctors to observe the lesion area of cardiovascular disease, and provide an intuitive and effective visual basis for the diagnosis of cardiovascular disease.

Key words image processing; parallel region growing algorithm; mind evolutionary algorithm; cardiovascular system; region of interest extraction; four-dimensional visualization

OCIS codes 100.6950; 100.6890; 170.6920

收稿日期: 2017-09-22; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61771266, 81571753)、内蒙古科技大学创新基金(2014QDL045)、包头市青年创新人才项目(NGII20170705)

作者简介: 任国印(1985—),男,硕士,讲师,主要从事医学图像处理方面的研究。E-mail: renguoyin@imust.edu.cn

1 引言

血管病变是心血管疾病的发病主因,该疾病具有高患病率、高致残率、高死亡率等特点。血管病变具有隐秘性和逐渐性的特点,在发病前一般没有明显的发病征兆,当患者出现身体不适感,甚至感到胸闷并伴有疼痛感时,说明心血管病情已经加重或有致死危险。在心血管病早期,采用计算机断层扫描(CT)检查往往可以及时发现血管器质性变化,对早期心脏病的防治和发现具有至关重要的作用。

目前,计算机辅助诊断领域尚未有一种方法能够自动提取心血管的三维模型。虽然 O'Brien 等^[1]使用规划分割的区域生长实现了二维 CT 心脏冠状动脉血管的分割,但该方法无法处理数据量庞大的心脏四维数据;Schmitt 等^[2]以阈值方法为依据,采用区域生长方法获得了血管树结构;李雪丽等^[3]通过改善 Live wire 与区域生长法相结合的算法,使算法得以简化和优化,在进行血管图像分割时获得了比较满意的分割结果。目前,医学图像的数据量大,以往的串行分割算法运行效率低,对组织器官序列 CT 切片逐张计算导致计算复杂,耗时较长,分割较慢,不适合临床实时操作。康一鹤等^[4]、王雪^[5]运用改进的遗传算法对医学图像进行分割,虽然改进手段避免了种群早熟现象,但在寻找局部最优问题上受染色体基因的干扰较大。自 1998 年孙承意等^[6]提出思维进化算法(MEA)以来,遗传算法得到了有效改进,解决了种群早熟和处理器通信效率低等问题,并行 MEA 的性能远优于主从式并行遗传算法的性能。已有很多关于 MEA 应用及改进的报道^[7-9],其中王川龙等^[8]、俞俊等^[9]对 MEA 进行了收敛性证明,并给出了 MEA 在不同领域的具体应用。

为了解决在一般的通用计算机上无法完成大数据量 CT 影像的三维重建和病灶提取问题^[7,10-12],以及串行区域生长算法在分割区域面积过大时运算能力不足、局部心血管 CT 显示效果不实时等问题,本文对现有的区域生长算法进行并行化改进,同时对 MEA 进行优化,以实现局部病灶组织的快速、精确提取。

2 设计与改进

2.1 改进的并行区域生长算法

针对四维心脏图像分辨率较大的问题,首先进行数据预处理操作。将高分辨率图像按时间分辨率进行每个相位的分块处理,剖分的精度主要取决于并行算法的加速比,即

$$S_p = \frac{(N_{\text{slave}} + 1)S_g}{S_g + 2\lambda N_{\text{slave}}/M}, \quad (1)$$

式中 S_p 为并行算法的加速比, S_g 为群体数, N_{slave} 为群体成熟代数, λ 为与个体通信时间占评价某个个体总用时的百分比, M 为子群成熟需要的代数。

从(1)式中可以看出,群体数与并行加速比存在一定的关系,即在 N_{slave} 和 λ 一定的前提下,随着群体数 S_g 增大, S_p 也增大。为了增加群体数,需要对原始数据进行分块预处理,将高维数据按照时间划分为更小的像素矩阵进行处理,随着像素剖分精度提高,加速比 S_p 随之增大;但图像原始分辨率的增加对并行算法处理时间的影响并不大,只会增加预处理阶段的耗时,因此对数据的预处理可解决算法对图像分辨率的限制问题。

为了解决串行区域生长算法在处理生长面积过大时计算能力不足的问题,本研究提出了一种基于三级队列反馈的并行化改进思想,线程调度先后进入 3 个队列,即种子点信息队列(SIQ)、四邻域寻找队列(FNQ)、阈值比较队列(TCQ),状态变量为种子点填充的状态数组 $S(i)$ 、四邻域像素的个数数组 $N(i)$ 、种子点和四邻域像素相似度状态数组 $F(i)$ ^[13]。对于同一队列中的各个任务,在完成每次调度时都要询问状态变量,以反馈每个队列的调度状态,改进的并行区域生长算法流程如图 1 所示。

2.2 MEA 优化的并行区域生长算法

虽然上述并行改进思想可以驱动多个种子点同时生长,也能够让多种子点并行达到终止条件,但由于传统区域生长算法的生长规则中要求预先定义相邻像素相似度的阈值范围,因此这种设定固定阈值范围的方法不适用于相邻血管边界模糊的心血管系统,分割方法死板,易导致错误分割,分割结果附带心肌组织。在三维空间中,种子点生长至血管边缘的收敛耗时长,而且容易陷入局部最优。忽略其他关键病灶,面对四维心脏这种大数据对象,计算过程中分割种子点过多,生长范围大,迭代计算量大,输入、输出关系相当繁琐,导致分割精度和速度无法满足临床需求,这些缺陷使得上述并行区域生长算法的收敛速度明显变慢,分割精度不高,甚至终止条件不收敛而导致算法崩溃^[11,14]。MEA 兼备搜索局部最优的趋同算子和全局最优的异化算子功能,可模仿人类的思维方式,突破了传统算法的局限,能够有效地优化生长规则,并拓展最优像素,其终止边界精细,能够加速并行区域生长算法的收敛速度,提高分割精度和误分割识别的成功率,从而在一定程度上弥补了并行区域生长算法的不足^[7-9,15]。

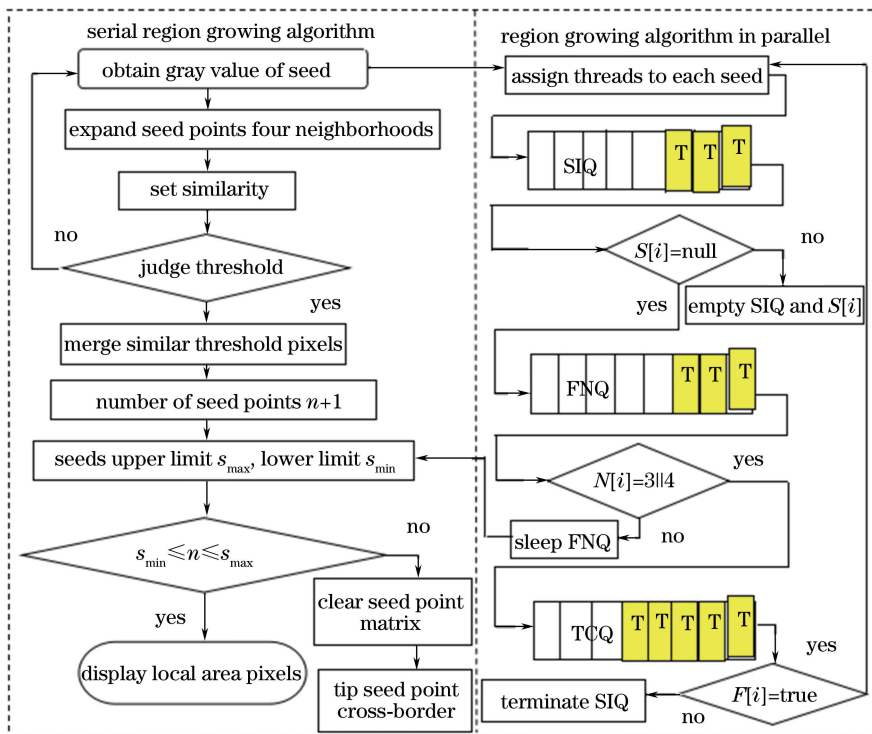


图 1 改进的并行区域生长算法流程

Fig. 1 Flow chart of improved parallel region growing algorithm

2.2.1 生长准则的 MEA 优化

四邻域扩展种子点周围的像素时,传统区域生长算法采用固定阈值范围作为判据扩展种子点,而 MEA 采用优化动态阈值的方法约束种子点的扩充。

本研究将动态像素间的相对阈值——灰度阈值 (g) 作为像素生长效果的评价标准,即

$$g = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{\varphi_1 + \varphi_2}, \quad (2)$$

式中 φ_1 和 φ_2 为相邻像素的灰度均值。 g 值越小,说明生长效果越好。

MEA 的组成构件如图 2 所示,其中为 I_1 、 I_2 、 I_N 为进化过程中的群体或个体。在血管提取过程中,MEA 组成构件的作用如下:1) 环境。以像素的

灰度空间作为 MEA 环境。2) 趋同算子。在所有种子点中搜索周围 g 值较小的像素作为新的种子点,将每次与周围像素灰度均值对比的 g 值记录在局部公告板上,并将分数最高的像素作为胜者加入种子点集合。3) 局部公告板。记录每次像素对比中扩展个体的序号,以像素灰度均值的 g 值作为对比的动作,对每次对比进行打分并记录得分明细。4) 异化算子。对比各种子点群体的像素个数,淘汰像素个数较小的小群体或灰度值相差大的群体,原因是这些小群体很可能是图像中的噪声信号。淘汰小群体能消除图像噪声,清除干扰与误分割。5) 全局公告板。记录每次种子点的群体序号,以种子点群体的灰度差异比较作为动作,对每次种子点群体的对比进行打分并记录得分明细。

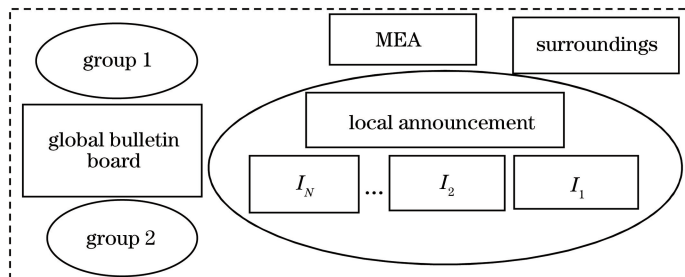


图 2 MEA 的组成构件

Fig. 2 Composition of MEA

MEA 的记忆力非常强大,正是这些记忆功能加强了思维的进化功能,每次分割结果能够被反馈,通过反馈得到的先验知识可以明确哪些种子点可以作为最优的拓展体素,该反馈机制提高了区域生长算法的生长精度。通过记录进化过程中高分的拓展对象能够指导进化趋势。

2.2.2 终止条件的 MEA 优化

动态阈值的设定直接影响分割区域的精确度,但是仅通过控制阈值达到精确提取血管的目的存在局限性。心脏周围存在许多连通域,因此提取局部某支血管来观察其是否有血管瘤或形态学是否有器质性变化不再可行^[11],原因是该图像中血管和心肌

相连的种子点的扩充会骤然增加。

如果种子点过多,则在迭代过程中算法复杂度明显增加^[14,16]。为了能够使并行区域生长算法在计算黏连组织方面发挥优势,对传统区域生长算法增加终止条件,以约束种子点边界的对比度,从而进一步完成算法改进。终止条件要求 MEA 选择 g 值大的种子点作为边界种子点。 g 值越大,说明血管边缘的分割结果越好。利用进化准则,在将逼近边界的种子点中取 g 值最大的点作为最优进化优胜边界点,其他 g 值较小的种子点被淘汰,以提高边界提取精度。 g 值约束前后的分割结果如图 3 所示。

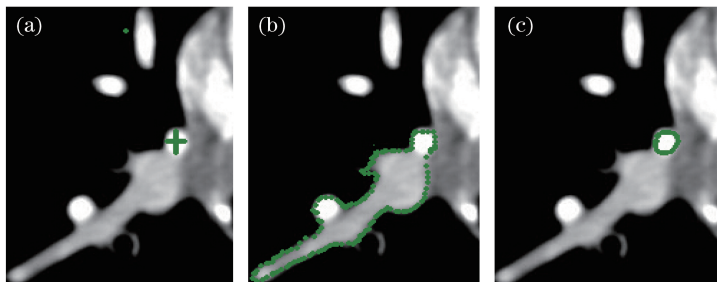


图 3 像素边缘约束效果。(a)血管种子点设置;(b) g 值约束前的血管分割;(c) g 值约束后的血管分割
Fig. 3 Constraint effect of pixel edges. (a) Blood vessel seed point setting; (b) blood vessel segmentation before g value constraint; (c) blood vessel segmentation after g value constraint

2.3 局部血管区域提取

在四维心脏模型中提取局部血管的步骤如下:

1) 通过多平面绘制体绘制技术显示心脏三视图,医生通过调整窗宽与窗位的交互作用,在心脏矢状面、冠状面、横断面上确定心脏局部感兴趣的种子点范围和坐标范围。

2) 通过 MEA 优化的并行区域生长算法将局部血管在序列二维切片中分割出来,借助四维显示技术将分割完成的血管序列图像进行四维显示。医生能够保存此次分割结果,以便与下一次分割结果进行比较,从而选择最佳结果。如果分割结果不符合医生的要求,可以重采样或重新划定感兴趣区域(ROI)。

3) 对重建结果进行重采样或重新提取,当医生能够清晰地观察到异常血管的起源、走向及周边分支等更加准确和直观的信息后,可停止进一步重采样。心脏病灶区域血管提取及四维可视化流程图如图 4 所示,其中 RGA 为区域生长算法。

3 结果与讨论

3.1 心脏四维可视化实时影像

图 5 所示为心脏 10 个时相的四维影像。医生

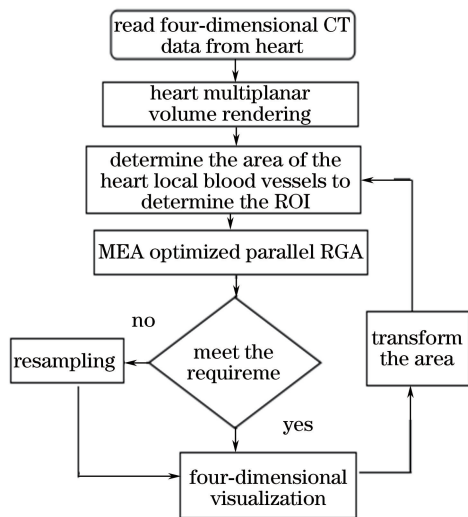


图 4 心脏病灶区域血管提取及四维可视化流程图
Fig. 4 Flow chart of cardiac lesion vascular extraction and four-dimensional visualization

通过放大、缩小和旋转等操作,可从不同角度观察心脏全局四维影像。

图 6 所示为未启用 MEA 优化算法时心脏病灶区域的提取效果。医生通过划定感兴趣区域观察心脏的任意局部病灶四维影像,实现局部心血管病灶的一次定位提取。提取后的血管三维体数据部分没

有进行边缘细化,因此表面粗糙。当医师进行放大操作时,粗糙效果更加明显。由图 6(a)可知,该大

面积提取结果会同时提取除血管以外的心肌组织,不便于观察局部某支病灶血管。

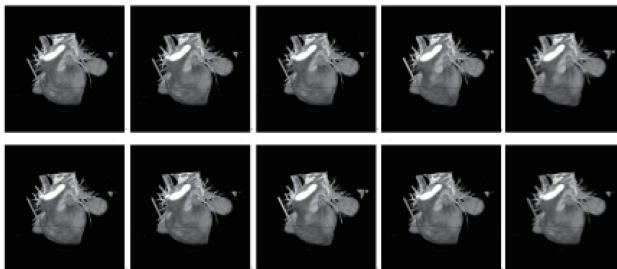


图 5 心脏四维 CT 动态绘制结果

Fig. 5 Dynamic rendering results for four-dimensional CT of heart

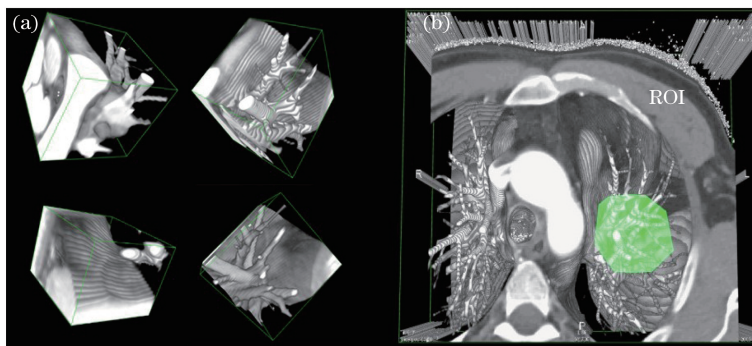


图 6 心脏局部病灶区域的提取结果。(a)局部三维组织的提取效果;(b)鼠标画出感兴趣区域

Fig. 6 Extraction results of local cardiac lesion area.

(a) Extraction of local three-dimensional tissue; (b) the area of interest drawn with mouse

3.2 四维血管实时显示效果

图 7 所示为启动优化算法设定边缘约束后提取血管的四维显示图像。由于心脏 CT 图像在分割环节容易出现边缘模糊的情况,因此会出现三维重建片状粗糙。为了符合临床显示效果,利用线性插值进行重采样,既可以提高其清晰度又不会失真。由图 7 可知,血管显示效果逼真且平滑。

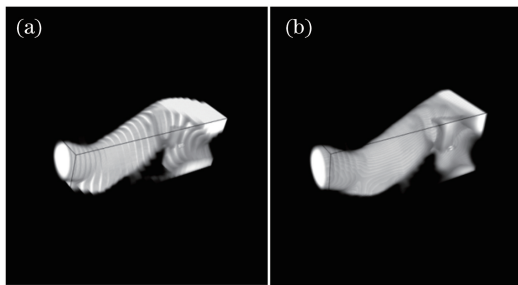


图 7 心脏局部血管(a)重采样前和(b)重采样后的结果

Fig. 7 Results of local cardiac blood vessels

(a) before and (b) after resampling

图 8 所示为血管多时相提取四维显示效果图。医生可以提取任意感兴趣的病灶血管并进行四维显示,能够观察某支血管有无局部膨大、局限性突出、变细或官腔是否可以闭合等形态学病变的病灶临床



图 8 血管的四维提取结果

Fig. 8 Four-dimensional extraction results of blood vessels

表现,同时能够对血管进行放大、缩小、旋转等操作,辅助医生观察血管的病变。

3.3 并行区域增长算法 MEA 优化前后的性能

图 9 所示为 MEA 优化前后血管提取运行时间的对比。由图 9 可知,在体数据的时相数为 1 时,没有达到预期的线程调度目的,因此优化的并行算法没有发挥优势。随着心脏体数据的时相数从 2 增至 10,优化的并行化算法的计算速度在血管分割过程中得到了明显提升,说明基于 MEA 优化算法在一定程度上解决了种子点扩充陷入局部最大值的问题。MEA 优化算法的效率高且稳健性好,在算法效率和实时性上发挥了优势。

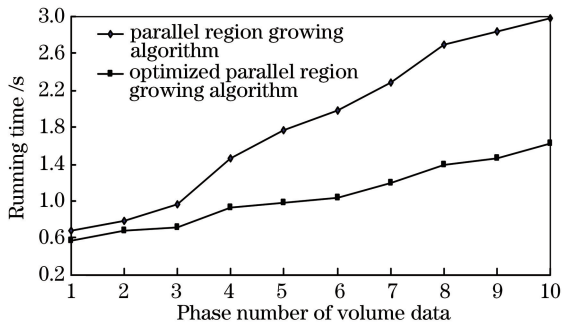


图 9 并行区域生长算法改进前后的时间对比

Fig. 9 Time comparison of parallel region growing algorithm before and after improvement

算法的稳健性分析如下:0~3 s 是该算法在 4 个时相时提取的初始化阶段,该算法能快速趋于稳定;在 15s 时,人为调整群体数,由 10 个突减到 7

个,系统对干扰因素的反应过程如图 10 所示。由图 10 可知,在干扰实施后系统响应出现突然变慢的情况,但系统具有良好的稳健性,能较好地抵抗外来干扰对系统的阻碍,快速趋于稳定。

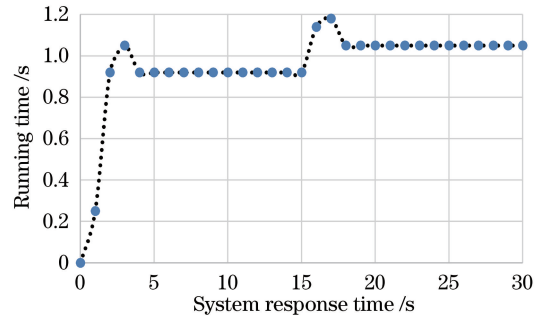


图 10 系统受扰后的稳健性分析

Fig. 10 Robustness analysis of the system after disturbance

表 1 所示为心脏及局部血管的四维显示性能。由表 1 可知,随着体数据增加,计算速度明显提高,数据的每秒帧数(FPS)呈递减的趋势。当时相数为 4 时,FPS 为 24.58,当心脏数据集的时相数增至 8 时,FPS 为 20.75,基本达到了实时显示的效果。心脏局部提取和显示耗时为 1.615 s,FPS 的最大值和最小值分别为 31.87 和 22.73。帧数变小的主要原因是用户进行了交互操作,如放大、缩小和旋转等,局部血管的重采样使得显示耗时为 1.702 s,FPS 的最大值和最小值分别为 30.57 和 21.21,FPS 可以达到实时的效果,重采样的实时性同样可满足医生的实际需求。

表 1 心脏及局部血管的四维显示性能

Table 1 Four-dimensional display performance of heart and local vessels

Data set	Phase volume data number	Resolution / pixel	Display time /s	FPS		
				Maximum	Minimum	
Heart data	4	256×256×256×4	0.928	24.58	18.87	
	8	256×256×256×8	1.399	20.75	16.39	
	10	256×256×256×10	1.622	18.34	13.78	
ROI	Non-resampling	10	60×40×126×10	1.615	31.87	22.73
	Resampling	10	60×40×126×10	1.702	30.57	21.21

Notes: The graphics workstation environment is as follows: central processing unit (CPU), Xeon E5-2603 v2, master frequency of 1.8 GHz; DDR4 memory of 4 GB; hard disk of 500 GB; graphic processing unit (GPU), NVIDIA Tesla K20C; CPU with 4 cores.

4 结 论

提出了串行区域生长算法的三级队列并行化改进策略;借助 MEA 的多种群进化思想改进并行区域生长算法的单种子点扩充机制,使其在完成多种子点的同时具有扩充和进化能力;经 MEA 优化的

并行区域生长算法的通信量非常小,提取结果精确,系统稳健性好,在外界干扰下能快速恢复稳定,能对四维心脏图像的任意感兴趣局部血管完成提取和四维可视化,方便医生观察病灶血管,为心血管疾病的诊断提供可视化依据^[17]。

借助血管四维可视化技术可以观察血管有无局

部膨大、局限性突出、变细或宫腔是否可以闭合等形态学病变的病灶临床表现。作为医学影像后处理技术中必不可少的辅助诊断手段,该技术既满足了随时间和呼吸体积形态变化的心脏的多维可视化,又提供了对心血管系统中病灶区域的定位和有针对性的三维提取。

该技术能够更直观地辅助医生诊断心血管病人的病情。心血管系统提取以及四维可视化技术可在心血管疾病的治疗及病灶区域的定位分析中提供更加直观的视觉依据,其独特的无创、高效、立体的医学影像技术提高了医生诊断心脏病灶的工作效率,使医生能够从繁琐的海量数据中解脱出来。该技术也适用于仿真结肠镜和仿真支气管镜的检查,在医学物理与工程学领域也具有一定的研究价值^[18]。

参 考 文 献

- [1] O'Brien J F, Ezquerro N F. Automated segmentation of coronary vessels in angiographic image sequences utilizing temporal, spatial, and structural constraints [J]. *Visualization in Biomedical Computing*, 1994, 14(2): 657-662.
- [2] Schmitt H, Grass M, Rasche V, *et al.* An X-ray-based method for the determination of the contrast agent propagation in 3-D vessel structures [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(3): 377-379.
- [3] Li X L, Zhou G H, Luo S X. Simplified fuzzy connected approach for segmentation of vessel images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(10): 1224-1229.
李雪丽, 周果宏, 罗述谦. 用于血管图像分割的简化模糊连接算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(10): 1224-1229.
- [4] Kang Y H, Li W J. Application of improved genetic algorithm in medical image segmentation [J]. *Information & Communications*, 2015(4): 38-39.
康一鹤, 李文俊. 改进型遗传算法在医学图像分割中的应用 [J]. *信息通信*, 2015(4): 38-39.
- [5] Wang X. Based on genetic algorithm of medical image segmentation technology research [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
王雪. 基于遗传算法的医学图像分割技术的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [6] Sun C Y, Xie K M, Cheng M Q. Mind-evolution-based machine learning framework and new development [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1999, 30(5): 453-457.
- [7] Sheng B. A three-dimensional threshold image segmentation method based on mind evolutionary algorithm [J]. *Electronic Quality*, 2016(5): 66-70.
盛彬. 基于思维进化算法的三维阈值图像分割 [J]. *电子质量*, 2016(5): 66-70.
- [8] Wang C L, Sun C Y. A study of convergence of mind-evolution-based machine learning [J]. *Journal of Computer Research & Development*, 2000, 37(2): 838-842.
王川龙, 孙承意. 基于思维进化的 MEBML 算法的收敛性研究 [J]. *计算机研究与发展*, 2000, 37(2): 838-842.
- [9] Yu J, Wang Z, Ji T M, *et al.* Wind power prediction research based on mind evolutionary algorithm [J]. *Computing Technology and Automation*, 2017, 36(2): 95-99.
俞俊, 王召, 籍天明, 等. 基于思维进化算法的风电功率预测研究 [J]. *计算机技术与自动化*, 2017, 36(2): 95-99.
- [10] Ma C X, Hu J J, Yan B. Optimization of fan-beam CT filtered back projection reconstruction algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091103.
马晨欣, 胡君杰, 闫镔. CT 扇形束滤波反投影图像重建算法优化 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091103.
- [11] Xie Z N, Zheng D, Chen J Y, *et al.* A tumor segmentation method of improved Chan-Vase model for liver cancer ablation computed tomography image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 021702.
谢志南, 郑东, 陈嘉耀, 等. 改进 Chan-Vese 模型的肝癌消融 CT 图像肿块分割方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 021702.
- [12] Hui Y, Wu J S, Yu B, *et al.* Construction and biomechanical analysis of integrated three-dimensional optical model of L3-L4 segment of spine [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0707001.
惠宇, 武君胜, 鱼滨, 等. 脊柱 L3~L4 段的一体化三维光学模型构建及其生物力学分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0707001.
- [13] Lu K Z, Peng R, Lin X H. Parallel algorithm of region growing based on multi-level queue [J]. *Computer Applications*, 2008, 28(2): 446-447, 451.

- 陆克中, 彭蓉, 林晓辉. 一种基于多级队列的并行区域生长算法 [J]. 计算机应用, 2008, 28(2): 446-447, 451.
- [14] Wang S K, Pan J X, Chen P. Adaptive segmentation algorithm for CT image sequence based on structure continuity as prior information [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111006.
王苏恺, 潘晋孝, 陈平. 基于结构连续先验的 CT 图像序列自适应分割算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111006.
- [15] Li X M. A mind evolutionary algorithm including genetic operator [J]. *Digital Technology and Applications*, 2015(12): 140-141, 143.
李晓敏. 一种包含遗传算子的思维进化算法 [J]. 数字技术与应用, 2015(12): 140-141, 143.
- [16] Ma J L, Cui Z M, Wu J, *et al.* Novel ROI segmentation method using region growing [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(5): 1582-1585.
- 马建林, 崔志明, 吴健. 一种新的基于区域生长的 ROI 分割算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5): 1582-1585.
- [17] Wu W, Guo J Q, An S Y, *et al.* Application of mind evolutionary algorithm optimized neural network model to predict the incidence of hemorrhagic fever with renal syndrome [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2016, 33(1): 27-30.
吴伟, 郭军巧, 安淑一, 等. 使用思维进化算法优化的神经网络建立肾综合征出血热预测模型 [J]. 中国卫生统计, 2016, 33(1): 27-30.
- [18] Yang Y R, Dai Y. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0333001.
杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网膜像质的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0333001.