



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象学报 中国图形学报

2014

09

VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第19卷第9期 (总第221期)

2014年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

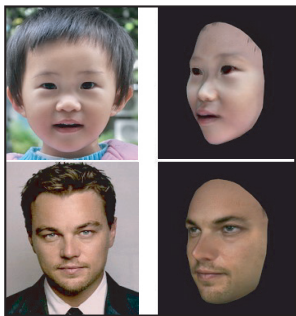
国内定价 50.00元



自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法(第1268页)



加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪算法(第1316页)



结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建(第1349页)

综述

能量泛函正则化模型在图像恢复中的应用分析

李旭超, 刘海宽, 宋博 1247

图像处理和编码

融合最小化失真与模型保持的隐写算法

高瞻瞻, 汤光明, 张伟伟 1260

自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法

刘婧, 干宗良, 崔子冠, 陈昌红, 朱秀昌 1268

基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

郭从洲, 秦志远, 时文俊 1282

分块策略实现图像椒盐噪声密度估计

林亚明, 李佐勇, 林叶郁 1288

图像分析和识别

Dempster-Shafer证据融合金字塔韦伯局部特征的表情识别

王晓华, 金超, 任福继, 胡敏 1297

运动捕捉数据中足迹的谱聚类检测方法

刘晓平, 陆劲挺, 谢文军 1306

加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪

王飞, 房胜 1316

面向瓦当文字识别的改进水平集骨架提取

邓茜芸, 周明全, 武仲科, 王醒策 1324

改进复杂网络模型的形状特征提取

阮瑞, 江波, 汤进, 罗斌 1332

几何特性二元关系的直线匹配

胡海霞, 李钢 1338

图像理解和计算机视觉

结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建

张剑, 何骅, 詹小四, 肖俊 1349

利用背景加权和选择性子模型更新的视觉跟踪算法

黄安奇, 侯志强, 余旺盛, 刘翔 1360

计算机图形学

对可控Bézier曲线的改进

严兰兰, 韩旭里 1368

医学图像处理

结合区域生长与灰度重建的CT图像肺气管树分割

彭双, 肖昌炎 1377

检测肺结节的3维自适应模板匹配

高婷, 龚敬, 王远军, 聂生东, 孙希文 1384

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models(P1268)



Visual tracking based on discriminative dictionary and weighted local features (P1316)



Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation (P1349)

Review

- Application analysis of regularization model of energy functional to image restoration
Li Xuchao, Liu Haikuan, Song Bo 1247

Image Processing and Coding

- Steganographic method combining minimum embedding distortion and model preservation
Gao Zhanzhan, Tang Guangming, Zhang Weiwei 1260
- Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models
Liu Jing, Gan Zongliang, Cui Ziguan, Chen Changhong, Zhu Xiuchang 1268
- TV image denoising model based on energy functionals and HVS
Guo Congzhou, Qin Zhiyuan, Shi Wenjun 1282
- Image salt-and-pepper noise estimation based on partitioning strategy
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu 1288

Image Analysis and Recognition

- Research on facial expression recognition based on pyramid Weber local descriptor and the Dempster-Shafer theory of evidence
Wang Xiaohua, Jin Chao, Ren Fuji, Hu Min 1297
- Foot plant detection based on spectral clustering algorithm for motion capture data
Liu Xiaoping, Lu Jintong, Xie Wenjun 1306
- Visual tracking based on the discriminative dictionary and weighted local features
Wang Fei, Fang Sheng 1316
- Skeleton extraction using improved level set methods in eaves' text recognition
Deng Qianyun, Zhou Mingquan, Wu Zhongke, Wang Xingce 1324
- Improved shape feature extraction using complex network model
Ruan Rui, Jiang Bo, Tang Jin, Luo Bin 1332
- Line matching based on binary relations of geometric attributes
Hu Haixia, Li Gang 1338

Image Understanding and Computer Vision

- Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation
Zhang Jian, He Hua, Zhan Xiaosi, Xiao Jun 1349
- Visual object tracking method based on weighted background and selective sub-model update strategy
Huang Anqi, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng, Liu Xiang 1360

Computer Graphics

- Improvement of the modifiable Bézier curves
Yan Lanlan, Han Xuli 1368

Medical Image Processing

- Segmentation of pulmonary airway tree in CT images by combining region growing and grayscale reconstruction algorithms
Peng Shuang, Xiao Changyan 1377
- Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection
Gao Ting, Gong Jing, Wang Yuanjun, Nie Shengdong, Sun Xiwen 1384

中图法分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)09-1384-08

论文引用格式: Gao T, Gong J, Wang Y J, Nie S D, Sun X W. Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(9): 1384-1391. [高婷, 龚敬, 王远军, 聂生东, 孙希文. 检测肺结节的3维自适应模板匹配[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(9): 1384-1391.][DOI:10.11834/jig.20140916]

检测肺结节的3维自适应模板匹配

高婷¹, 龚敬¹, 王远军¹, 聂生东¹, 孙希文²

1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海肺科医院放射科, 上海 200093

摘要: **目的** 针对传统模板匹配方法检测肺结节存在的问题, 提出一种用于CT图像中检测肺结节的3维自适应模板匹配算法。 **方法** 首先, 从CT序列图像中分割出3维肺实质, 采用Canny算子等方法从分割出的3维肺实质中提取3维感兴趣区域作为候选肺结节; 然后, 确定每个3维感兴趣区域的主方向和中心层, 并以此中心层作为信息层, 沿主方向对信息层进行3维扩展生成3维模板; 最后, 对自适应模板和候选结节的3维归一化互相关(NCC)相关系数进行计算, 将相似性高于设定阈值的区域标记为肺结节。 **结果** 采用66个临床CT病例对本文方法进行了肺结节检测实验, 结果显示本文方法对肺结节检测的敏感率为95.29%, 假阳性为12.90%。 **结论** 本文方法对检测肺结节具有较高的敏感率和准确率, 可在临床上有效辅助放射科医生对肺结节进行检测, 从而提高放射科医生检测肺结节的准确性和工作效率。

关键词: 肺结节; 计算机辅助检测; 模板匹配; 3维自适应模板

Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection

Gao Ting¹, Gong Jing¹, Wang Yuanjun¹, Nie Shengdong¹, Sun Xiwen²

1. School of Medical Instrument & Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Radiology Department, Shanghai Pulmonary Hospital, Shanghai 200093, China

Abstract: **Objective** Focusing on the traditional template matching method for nodule detection, a 3D adaptive template matching algorithm for lung nodules detection has been proposed in this paper. **Method** First of all, 3D lung parenchyma is segmented from the scanned CT images, and then, canny operator is employed for extracting 3D ROI which will be used as the candidate pulmonary nodule. Secondly, collect the main direction of the 3D ROI and locate the center slice, and expand the 3D adaptive template from the center slice trace along the main direction. At last, calculate the correlation coefficient between the 3D adaptive template and pulmonary nodule candidate image by applying Normal Cross Correlation (NCC) algorithm, and set a threshold value of NCC for marking the higher correlation coefficient regions as detection results. **Result** Based on 66 clinical cases' experiment, the sensitivity reaches 95.29% and false positive is 12.90%. **Conclusion** The experiment results show that our method has high sensitivity and accuracy and can help radiologists to detect nodules effectively.

Key words: lung nodule; computer-aided detection (CAD); template matching; 3D adaptive template

收稿日期: 2014-01-07; 修回日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972122, 61201067); 上海市教委科研创新项目(14ZZ135, 13YZ069)

第一作者简介: 高婷(1987—), 女, 2013年于上海理工大学获得工学硕士学位, 主要研究方向为医学图像处理与分析。E-mail: tinagog2525@163.com

通信作者: 聂生东, E-mail: nsd4647@163.com

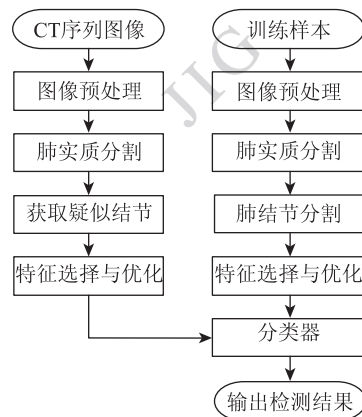
0 引言

据统计,在所有癌症中,肺癌的发病率和死亡率都占据第一位^[1-2]。肺癌早期诊断困难,而晚期又难以治愈是肺癌的发病率和死亡率居高不下的主要原因。数据显示,肺癌患者5年的存活率仅为11%~17%,80%肺癌患者的生存时间一般不会超过1年。降低肺癌死亡率的关键是针对肺癌高危人群进行肺癌筛查,以便于早发现、早诊断、早治疗。临床表明,经早期治疗的一期肺癌患者5年的存活率可提高到60%,二期肺癌患者的5年存活率可达40%~50%^[3]。肺癌在早期一般表现为肺结节(lung nodule)^[4-5],因此,肺结节检测成为早期诊断肺癌的关键。

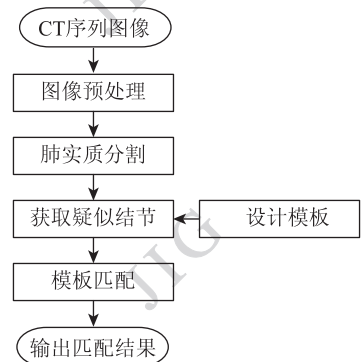
肺结节可进一步细分为实质性结节(solid nodule)和亚实质性结节(sub-solid nodule)^[4]。其中,完全屏蔽肺实质的病灶称为实质性结节,其具有完全不透明性,且密度较高,边缘也比较清晰。而亚实质性结节可进一步细分为:1)部分实质性(part-solid)结节。内有斑片状、完全不透明的实质性部分,其余部分为毛玻璃样密度。2)非实质性(non-solid)结节。完全具有毛玻璃样密度,与实质性结节相比,亚实质性结节具有密度较低、边缘不清晰(多带毛刺)等特征,因此,临床上不易检测。

目前,螺旋CT作为临床上肺部疾病诊断最常用的手段,肺部CT扫描获得的图像数据量极大,仅仅依靠人工阅读CT图像来检测肺结节费时、费力,且往往容易发生漏诊和误诊等情况,平均约27%的结节被遗漏^[6],因此基于CT图像的计算机辅助检测(CAD)技术应运而生。该技术能大幅度减轻放射科医生的阅片负担,并有效辅助放射科医生提高诊断的正确率和诊断效率^[7]。因此,CAD逐渐成为目前医学影像学领域的研究热点。

近年来,基于CT图像的肺结节计算机辅助检测方法主要分为两类:基于分类器的方法和基于模板匹配的方法^[8-17],这两种方法的系统流程如图1所示。其中,基于分类器的方法主要包括以下步骤:图像预处理,肺实质分割,获取疑似结节,特征选择与优化,分类器设计。该方法的优点是检测的假阳性较低,缺点是检测的敏感率也较低,算法过程相对复杂。基于模板匹配方法的基本思想则是,将设计好的肺结节模板作为搜索因子,在原图像中遍历搜



(a) 基于分类器的方法



(b) 基于模板匹配的方法

图1 肺结节检测流程

Fig. 1 Lung nodule detection workflow

索,计算模板和原图像中感兴趣区的几何形状和灰度值的相似度。模板设计是该方法的关键,模板与实际结节的相似度越高,检测结果就越好,因此,模板设计一直是该领域研究的重点。相比于基于分类器的方法,基于模板匹配方法的优点是检测敏感率较高,算法简单,缺点是检测的假阳性也偏高。目前,CAD研究大都集中在基于分类器方面,但由于基于模板匹配检测方法具有检测敏感率高、方法简单易于实现等优势也引起了许多学者的关注。

目前模板匹配检测肺结节的方法所设计模板的几何形态多为固定形态,其中球形模板最为广泛,也有少量文献采用椭圆形模板和部分可变形模板,检测对象均为实质性结节。Lee等人^[8]提出基于遗传算法的模板匹配方法(GATM),采用快速匹配的方法,可检测5~30mm的结节,敏感率约72%。Farg等人^[9]设计出可变形的2维及3维模板,结合NCC匹配算法和前置贝叶斯分类器算法进行模板匹配,最终得到82.3%的敏感率和9.2%的假阳性率。

Wang 等人^[10]对3维模板进行了改进,虽然实验敏感率达到100%,但假阳性率偏高,高达30.43%。Kohandan 等人^[11]设计了基于灰度变化的模板,Osman 等人^[12]在其基础上增加了提取感兴趣区域的环节,检测敏感率达到92.3%,假阳性率达到9.2%。Jamshid 等人^[13]采用3维几何特征计算方法,设计了基于球形的增强模板,其检测敏感率约90%,假阳性率为14.6%。Joao 等人^[14]在3维重建的基础上设计模板匹配的方法,检测敏感率为84.84%。

目前基于模板匹配检测肺结节方法对结节模板的设计均采用固定尺寸,直径参数为3 mm时,肺结节分析软件的诊断价值最大^[18],其余模板匹配所产生的计算量是冗余的。同时,这些方法的检测对象都是实质性肺结节,对其检测效果尚可,但对于亚实质性结节的检测效果并不理想。为此,提出基于3维自适应模板匹配肺结节的检测算法。

1 自适应模板匹配算法

通常情况下,放射科医生对肺结节进行检测的基本步骤如下:首先,整体阅片,即快速浏览患者的肺部CT序列图像,初步定位疑似结节的部位为“阳性病灶”;其次,对每一个“阳性病灶”区域进行局部分析,通过观察“阳性病灶”上下层面的血管、气管和淋巴管的纹理特征、“阳性病灶”和邻近部位肺部纹理的延续过程,判断该“阳性病灶”的病变特性是结节、钙化点或其他病变;最后,将确定为结节的病灶进行进一步良、恶性鉴别。本文提出的自适应模板匹配算法参考放射科医生人工检测肺结节的过程,基本流程如图2所示,通过感兴趣区域的提取实现临床医生诊断的第1个过程,并利用自适应模板匹配实现第2个过程。

自适应模板匹配肺结节检测方法主要步骤如下:

1) 图像预处理。对原始图像的窗宽、窗位进行调整,利用自适应中值滤波和小波变换等算法进行预处理,以提高图像的信噪比。

2) 肺实质3维分割。利用阈值分割、自动定位肺实质的3维区域生长等算法对预处理图像的肺实质进行分割。

3) 感兴趣区域(ROI)的3维分割。利用Canny算子边缘检测结合形态学运算的方法提取肺实质图像的感兴趣区域,作为疑似结节。

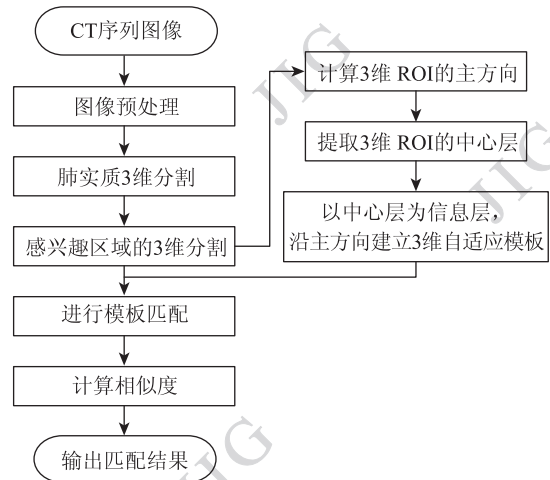


图2 基于3维自适应模板匹配的肺结节检测方法流程图
Fig. 2 Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection workflow

4) 建立3维自适应模板。针对每一个感兴趣区域建立自适应模板。首先,计算每个3维感兴趣区域的主方向;然后,提取3维感兴趣区域的中心层;其次,以中心层为信息层,将其进行3维扩展,沿主方向建立3维自适应模板。

5) 模板匹配计算。计算感兴趣区域与3维自适应模板的归一化相似度相关系数。

6) 标记匹配结果。设定匹配相似度阈值,将高于阈值的感兴趣区标记为肺结节。

1.1 图像预处理和感兴趣区域(ROI)的分割

为提高图像的信噪比,使结节边缘清晰且与周围组织的灰度有较高对比度,首先对原图像窗宽、窗位进行调整;然后,利用中值滤波有效去除CT图像中最常见的噪声——椒盐噪声^[19];最后,利用小波变换对图像进行分解,运用高频增强算法对分解后的图像的高频成分进行增强,增强图像的边缘细节信息^[20],结果如图3(b)所示。经过预处理后,肺实质内部的对比度得到明显改善,肺内正常组织和病变组织的边缘清晰、层次分明。

肺实质分割有助于将肺结节检测范围限定在肺实质区域内,从而提高检测的准确度,降低假阳性率^[21-22]。本文采用以下步骤实现对肺实质的全自动快速分割:首先,通过阈值分割获取二值图像;然后,自动定位肺实质区域种子点,利用3维区域生长算法和形态学处理得到完整的肺实质掩膜;最后,将其掩膜覆盖到原图像,得到肺实质区域的图像如图3(c)所示。

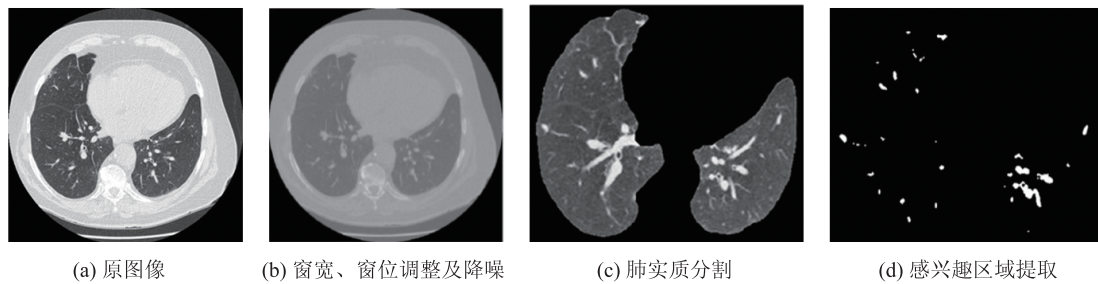


图3 图像预处理和感兴趣区域(ROI)的分割

Fig. 3 Image processing and regions of interest (ROI) segmentation

在感兴趣区域提取过程中,利用 Canny 算子进行分割,具体过程如下:首先,利用 Canny 算子做边缘检测,并进行连通区域连接、分支去除和填充空洞等形态学处理;然后,采用半径为层厚的球形对图像进行开运算,去除面积过小的连通区域(小于层厚的区域);最后,将3维连通区域直径大于30 mm的区域去除。分割出的3维感兴趣区中可能包含有肺结节、血管、钙化点、淋巴管等不同组织。因此,将分割出的这些感兴趣区称为疑似肺结节。

应用开运算、闭运算和填充空洞的形态学处理方法对肺实质掩模进行平滑。开运算和闭运算是以膨胀和腐蚀为基础的图像形态学运算,膨胀运算能扩大图像,而腐蚀运算能收缩图像。3维区域生长种子点的确定方法如下:对30组手动分割的肺实质图像进行统计。对一个完整的病例而言,肺实质部位的区域通常集中在图像集的中后部,例如,一个有267层CT图像的病例,包含肺实质区域的图像为63~243层,其中,肺实质部位面积最大的层数为第158层,设定肺实质区域最大的相对位置为相关参数 A 。通过统计数据表明,30组手动分割的肺实质图像, A 介于0.58~0.73。将30组统计图像中,相关参数 A 为0.66的图像进行提取,进一步统计其中肺实质覆盖率为100%的区域,定义左肺和右肺的种子点(130, 280)和(360, 280)。ROI的3维分割实验过程结果如图3(d)所示。

1.2 3维自适应模板的建立

3维自适应模板生成过程如下:将每一个2维感兴趣区域作为信息层,并对其2维图像进行3维投影,得到自适应模板锥形;截取3维投影的截面图,利用感兴趣区域的主方向特征对其进行位移调整,完成该信息层的3维自适应模板。

如图4所示,自适应模板创建流程如下:首先,利用3维感兴趣区域掩模,提取出感兴趣区域;然后,选取感兴趣区域的中间层图像作为信息层,并将信息层采用投影的方式获得3维模板图像;最后,对判断为“疑似大结节”类的感兴趣区域,附加上其主方向特征。

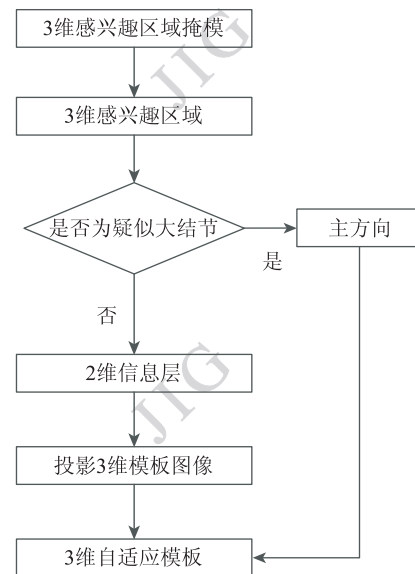


图4 3维自适应模板的创建流程图

Fig. 4 3D adaptive template construction workflow

自适应模板创建的详细步骤描述如下:

1) 分割出感兴趣区域模板图像 ROI_{bw} (图5(a))。

2) 获取感兴趣区域的原图像

$$ROI = I \times ROI_{bw} \quad (1)$$

将掩模图像 ROI_{bw} 覆盖在原图 I 上得到感兴趣区域的原图像 ROI (图5(b))

3) 将感兴趣区域原始图像 ROI 的中间层图像 $ROI(\text{middle})$ 作为信息层。

4) 建立坐标系,从2维信息层投影出3维信息。

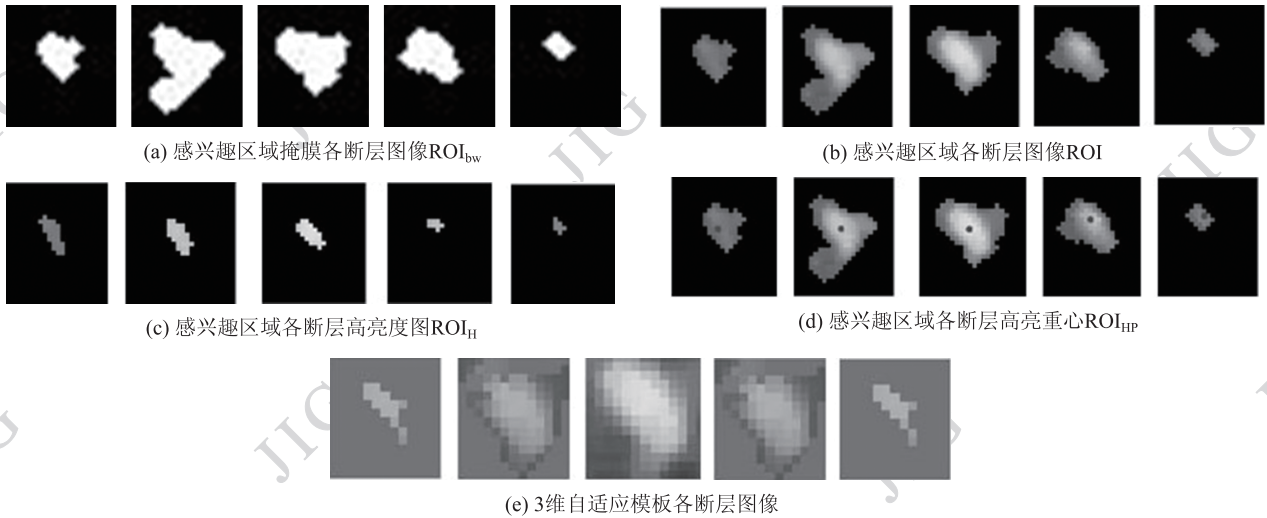


图5 3维自适应模板创建过程

Fig. 5 Three dimensional adaptive template construction images

以 ROI(middle)的中心 O 为原点,以像素为单位,建立 2 维坐标系 A ,令 $A(x,y)$ 为 ROI(middle) 相对应的每一点的灰度值。同时,另以像素为单位建立 3 维坐标系 B , $B(x,y,z)$ 为每一点对应的灰度,则 2 维至 3 维投影为

$$B(x,y,z) = A\left(\sqrt{\frac{x^2+y^2+z^2}{x^2+y^2}}x, \sqrt{\frac{x^2+y^2+z^2}{x^2+y^2}}y\right) \quad (2)$$

5) 3 维自适应模板生成。将 CT 序列图像的层距作为 3 维自适应模板的层距,取以层距为中心、上下偏移半个层厚的各断层灰度值均值作为 3 维自适应模板断层图像的灰度值,则 3 维自适应模板的各层灰度 $M_{SD}(x,y)$ 可表示为

$$M_{SD}(x,y) = \text{mean}\left(\sum_{k=SD_n-\frac{ST}{2}}^{SD_n+\frac{ST}{2}} B(x,y,k)\right) \quad (3)$$

式中, SD 为层距, ST 为层厚, $\text{mean}()$ 为取平均函数。

6) 对自适应模板附加主方向特征。将“疑似大结节”类 3 维感兴趣区域图像的各层高亮度区域重

心轨迹定义为“主方向”特征,记为 ROI_{HP} 。具体计算过程如下:

(1) 提取感兴趣区域的原图像 ROI 每一层的高亮区域。高亮区域提取的方式如下:针对于单层感兴趣区域图像,记灰度的最大值为 $RD_{\max}$,记灰度的最小值为 $RD_{\min}$,令高亮区域分割阈值 RD 为

$$RD = 0.9 \times (RD_{\max} - RD_{\min}) + RD_{\min} \quad (4)$$

(2) 利用阈值 RD 对图像 ROI 的每一层进行分割得到感兴趣区域高亮度图 ROI_H ;

(3) 提取感兴趣区域高亮度区域 ROI_H 每一层的重心,连接所有层的重心,得到一条曲线作为主方向 ROI_{HP} 。

1.3 模板匹配算法

相似性相关系数归一化算法(NC)是一种经典的统计算法^[23]。匹配相似度通过 NC 算法计算实验图像与模板图像之间的相似性相关系数来确定,相似性相关系数最大时,则认为匹配成功。将 2DNC 算法扩展为 3DNC 算法,即

$$\text{NC}_{3D}(x,y,z) = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c S(x+i,y+j,z+k) T(i,j,k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c S(x+i,y+j,z+k)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c T(i,j,k)^2}} \quad (5)$$

式中, (a,b,c) 是模板匹配的范围大小, $S(x,y,z)$ 为原图像在坐标点为 (x,y,z) 时所对应的灰度值, $T(x,y,z)$ 为模板图像在坐标点为 (x,y,z) 时所对应的灰度值,匹配结果 $\text{NC}_{3D}(x,y,z)$ 为一个介于 0~1

的小数,越接近 1,说明匹配相似度越高。

本文采用感兴趣区域的提取环节,每个感兴趣区都对应一个由该感兴趣区生成的自适应模板。这样设计就将模板匹配的方式由遍历搜索变为感兴趣

区与其生成的模板之间的匹配,从而大幅度减少由遍历搜索而增加的计算量。另外,采用自适应模板的方法,还能提高检测的敏感率和准确率,并能进一步降低假阳性。

2 实验结果与数据分析

2.1 检测性能实验

采用来自上海市肺科医院的飞利浦 brilliance TM40 层多排螺旋 CT 扫描的 66 组病例数据。该 CT 一圈扫描实现 40 mm 的覆盖范围,40 个层面/圈的超级采集效率,40 幅/s 的高速图像重建,0.625 mm 层厚的各项同性成像。共包含 85 个结节,其中实质性结节 63 个,非实质性结节 22 个,扫描层厚均为 2 mm,结节直径为 3~20 mm。选取图像矩阵大小为 512×512 像素,空间分辨率为 0.683 6~0.799 3 mm,作为对本文算法性能评价

的测试集。利用配置为 Intel® Core(TM) i6-2450M 双核处理器和 6 GB 内存的电脑进行编程,使用 Matlab 作为编程工具。

检测算法的准确率主要是通过两方面的指标确定:敏感性(sensitivity)和特异性(1-FP)。敏感性和特异性都是用一个概率值来表示。敏感率越高,表明检测算法效果越好,漏检率越低。特异性越高,表明检测算法假阳性个数越少,误检率越低。

通过两种方法的对比实验结果(表 1)表明,本文设计的 3 维自适应模板匹配检测肺结节方法,具有非常高的灵敏度和准确率,相对于已有的模板匹配算法具有更好的肺结节检测效果,可以给医生提供有力的参考。其中,TP 为检测出的真阳性结节,即检测结果和真实结果相符合;FP 为检测出的假阳性结节,即检测结果并非真实结节;FN 为没有检测出来的真阳性结节即假阴性,即真实结节没有被检测出来。

表 1 模板匹配准确率检测实验结果和算法运行时间对比实验结果

Table 1 Experiment result between template detection methods

方法	结节数量	检测结果				准确率/%	敏感率/%	假阳性/%	算法的运行时间/s
		结节总数	TP 数	FP 数	FN 数				
文献[10]	85	135	70	65	15	46.67	82.35	48.15	34.56
本文	85	93	81	12	4	83.51	95.29	12.90	12.56

然后,使用一个典型的数据集来做算法运行时间对比实验。该数据集层厚为 2 mm,共有 267 幅分辨率为 512×512 像素的 CT 图像,其中包含一个 6 mm 直径的肺结节。参考 Peng^[10]的经典模板匹配的方法,实现并使用 3 种不同层切方式的 6 mm 直径的高斯球形模板,同自适应模板匹配方法进行对比实验。在实验的过程中,采取同样的预处理和肺实质分割方式,计算时间损耗的过程始于感兴趣区域提取,至匹配结束。实验结果证明,本文设计的自适应模板匹配方法,在准确地检测出结节位置的基础上,能大量地节省计算量和计算机的损耗,节约时间。

2.2 ROC 曲线分析

ROC 曲线评价统计量 A 表示为 ROC 曲线下面积的值,通常是 0~1 的小数。 A 的计算为

$$A = \frac{1 - S + FPR}{2} \quad (6)$$

式中, S 表示敏感率, FPR 表示特异性。

如图 6 所示 A 越接近于 1,说明检测效果越好。一般情况下,当 A 的值在 0.5~0.7 时,有较低的准确性;在 0.7~0.9 时,有一定准确性;在 0.9 以上时有较高的准确性。 $A=0.5$ 时,说明检测方法完全不起作用,无应用价值。 $A<0.5$ 不符合真实情况,在实际中极少出现。本文利用测试结果绘制了 ROC

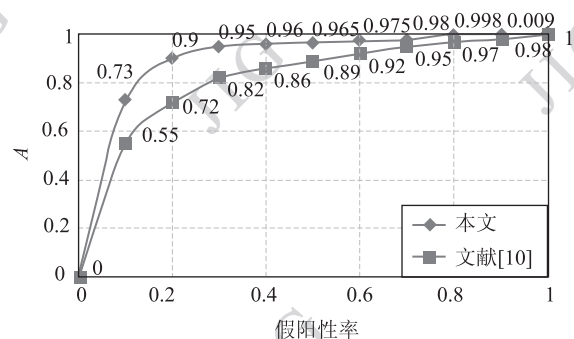


图 6 模板匹配方法的 ROC 曲线分析结果

Fig. 6 The ROC curve analysis result of template matching methods

曲线,在本文的测试方法中, A 最高为 0.85,敏感率为 92%,假阳性约为 20%。通过 ROC 曲线分析结果表明,本文提出的自适应模板匹配算法较文献[10]对不同类型的肺结节具有更好的检测性能。

3 结 论

通过对比实验结果表明,本文设计算法的优越性主要表现在以下方面:

1) 基于临床医生对肺结节的人工诊断方法,对传统模板匹配方法的流程做出改进,提出 3 维自适应模板匹配方法。利用提取感兴趣区域方法,模拟医生定位疑似病灶过程;参考临床医生对每一个阳性病灶区域进行局部分析的过程,对每一个感兴趣区域进行 3 维自适应模板的建立和匹配。

2) 增加感兴趣区域的提取环节。一方面,它是 3 维自适应模板生成的预备工作;另一方面,它将模板匹配由遍历搜索转变为定点定位,大大减少了计算量,提高了检测的效率。

3) 跳出固定形态模板的设计理念,提出自适应模板匹配的方法。本文自适应模板的设计理念由传统可变形模板的研究得来,该方法充分利用高精度 CT 图像 3 维信息全面的优势。自适应模板匹配的设计理念初步模仿了临床医生对肺结节的诊断过程,是计算机科学与人脑思维模式的结合,为后续的研究引出了新的思路。

虽然本文在肺结节检测的研究工作上有一定的突破,但在算法研究方面仍然存在一定的不足,算法有效性也需进一步改进。在今后的研究中,可在以下方面进一步努力:

1) 改进感兴趣区域提取的方法,尝试使用更多的图像分割方法,降低感兴趣区域提取时造成的漏检。

2) 对自适应模板的设计做进一步改进。结合医生的临床诊断经验,对自适应模板的生成模块进行改进,使检测效果更佳,精度更高。

综上所述,本文设计的肺结节检测方法能减少计算量,提高准确度,降低漏检检测率和假阳性率;它能全自动完成肺结节检测,有效减轻医生的阅片负担。该方法虽然不尽完善,但为后续研究提供了新的思路。

参考文献 (References)

- [1] He J, Zhao P, Chen W. 2012 China Cancer Registration Report [M]. Beijing: Military Medical Science Press, 2013.
- [2] Rebecca S, Deepa N, Ahmedin J. Cancer Statistics 2012 [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2012.
- [3] American Cancer Society. What are the key statistics for lung cancer [EB/OL]. 2013-05-22 [2013-12-20]. <http://www.cancer.org/Cancer/Lung/Cancer-Non-SmallCell/DetailedGuide/non-small-cell-lung-cancer-key-statistics>.
- [4] Nie S D, Sun X W, Chen Z X. Progress in computer-aided detection for pulmonary nodule using CT image [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2009, 26 (2): 1075-1079. [聂生东, 孙希文, 陈兆学. 基于 CT 图像的肺结节计算机辅助检测技术的研究进展 [J]. 中国医学物理学杂志. 2009, 26 (2): 1075-1079.]
- [5] Minh N D, Martin V. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14: 2091-2106.
- [6] Kazuo A, Kohel M. Pulmonary nodule at chest CT: effect of computer aided diagnosis on radiologist detection performance [J]. Radiology, 2004, 230: 347-352.
- [7] Kostis W J, Reeves A P, Yankelevitz D F, et al. Three-dimensional segmentation and growth-rate estimation of small pulmonary nodules in helical CT images [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(10): 1259-1274.
- [8] Lee Y, Hara T, Fujita H, et al. Automated detection of pulmonary nodules in helical CT images based on an improved template-matching technique [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(7): 595-604.
- [9] Farag A A, El-baz A, Gimelfarb G, et al. Detection and recognition of lung abnormalities using deformable templates [C]// Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UK: IEEE Computer Society, 2004: 738-741.
- [10] Wang P, DeNunzio A, Okunieff P, et al. Lung metastases detection in CT images using 3D template matching [J]. Medical Physics, 2007, 34(3): 915-922.
- [11] Ozekes S, Camurcu A Y. Automatic lung nodule detection using template matching [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Information. Berlin: Springer, 2006: 247-253.
- [12] Onur O, Serhat O, Osman N U. Lung nodule diagnosis using 3D template matching [J]. Computers in Biology and Medicine, 2007, 37(8): 1167-1172.
- [13] Dehmeshki J, Ye X J, Lin X Y, et al. Automated detection of lung nodules in CT images using shape-based genetic algorithm [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2007, 31(6): 408-417.

- [14] João R F, Aristófanis C, Anselmo C, et al. Methodology for automatic detection of lung nodules in computerized tomography images [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2010, 98(1): 1-14.
- [15] Tartar A, Kilic N, Akan A. A new method for pulmonary nodule detection using decision trees[C] // Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka: IEEE, 2013, 7355-7359.
- [16] Sheng C, Suzuki, K. Computerized detection of lung nodules by means of "Virtual Dual-Energy" radiography [J]. Biomedical Engineering, 2013, 6(2): 369-378
- [17] Assefa M, Faye I, Malik A S, et al. Lung nodule detection using multi-resolution analysis [C] // Proceedings of International Conference on Complex Medical Engineering, 2013, 457-461.
- [18] Chen Y G, Tang R J. Multi slice spiral CT advanced lung analysis software based on the selection of parameters indiameter [J]. Guangdong Medical Journal, 2013, 34(3): 445-447. [陈玉桂, 汤日杰. 基于多层螺旋CT高级肺结节分析软件中直径参数的选择[J]. 广东医学, 2013, 34(3): 445-447.]
- [19] Liu X Y, Guo X H, Wang X H, et al. Walvet transform with other pretreatment method to enhance CT images of small peripheral lung carcinomas [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2006, 25(4): 233-238. [刘向晔, 郭秀花, 王晓华, 等. 基于小波变换结合其他预处理方法的周围型早期肺癌CT图像增强研究[J]. 生物医学工程研究, 2006, 25(4): 233-238]
- [20] Wang Q. Application of snakes model in pulmonary nodule detection [D]. Suzhou: Suzhou University, 2013. [王奇. 基于Snake模型的肺结节图像处理[D], 苏州: 苏州大学, 2013.]
- [21] Ren Y H, Nie S D. The three-dimensional lung segmentation from CT images [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(3): 1862-1865. [任彦华, 聂生东. 基于肺部CT序列图像的肺实质三维分割[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(3): 1862-1865.]
- [22] Sun S S. Lung nodule detection and segmentation method based on CT images [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. [孙申申. 基于CT影像的肺结节检测与分割方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.]
- [23] Wang Y S, Ruan Q Q. Application of image orientation and matching algorithm based on correlation matching method [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2002, 26(2): 20-24. [王岩松, 阮秋琦. 一种基于互相关的图像定位匹配算法研究及应用[J]. 北京交通大学学报, 2002, 26(2): 20-24.]