

结合快速傅里叶变换的肝实质病变特征量化检测

牛广利¹, 刘翔¹, 宋家琳², 汤显¹

1. 上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 第二军医大学长征医院超声诊疗科, 上海 200003

【摘要】目的:探讨针对高频超声图像下的肝实质病变特征进行量化检测的可行性。**方法:**收集47例轻、中、重度乙型肝炎肝硬化患者(轻度肝硬化组、中度肝硬化组、重度肝硬化组)及20名健康志愿者(正常对照组)的肝脏二维高频超声图像,采用快速傅里叶变换与图像形态学处理相结合的方法对肝实质进行处理,自动检测肝实质形态特征并量化提取病变特征数据,并通过评分策略对病变特征进行详细分类。**结果:**该评分策略所得数据在轻度、中度、重度肝硬化、正常对照组中差异具有统计学意义($P<0.001$)。在多重比较中,与正常对照组比较,组间差异均具有统计学意义,与轻度、中度肝硬化组比较,除重度肝硬化组组间差异不显著外,其余均具有统计学意义($P<0.05$)。**结论:**利用快速傅里叶变换可有效提取出符合医生视角的肝实质纹理特征并进行量化,为进一步对肝硬化分级诊断提供数据支撑。

【关键词】肝实质;肝硬化;傅里叶变换;量化检测;纹理特征

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)02-0188-06

Quantitative detection of liver parenchymal lesion characteristics after the combination with fast Fourier transform

NIU Guangli¹, LIU Xiang¹, SONG Jialin², TANG Xian¹

1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Department of Ultrasound Diagnosis and Treatment, Changzheng Hospital, the Second Military Medical University of Chinese People's Liberation Army, Shanghai 200003, China

Abstract: Objective To explore the feasibility of the quantitative detection of liver parenchymal lesions in high-frequency ultrasound images. **Methods** The two-dimensional high-frequency ultrasound images of the liver were collected from 47 patients with mild, moderate and severe hepatitis B cirrhosis (mild, moderate and severe cirrhosis groups) and 20 healthy volunteers (normal control group). By combining fast Fourier transform with image morphological processing techniques, the morphological features of liver parenchyma were obtained automatically, and the lesion characteristics were quantified. Finally, the pathological features were classified in detail by scoring strategy. **Results** There were statistical differences in the data obtained by scoring strategy among mild, moderate, severe cirrhosis groups and normal control group ($P<0.001$). The multiple comparisons revealed that the quantified data of cirrhosis groups were significantly different from those of normal control group, and that the differences between groups were statistical significant ($P<0.05$), except for the comparison between severe cirrhosis group and mild or moderate cirrhosis group. **Conclusion** The texture features of liver parenchyma in accordance with doctor's view can be extracted and quantified by fast Fourier transform, which provides data support for the further diagnosis and grading of liver cirrhosis.

Keywords: liver parenchyma; liver cirrhosis; Fourier transform; quantitative detection; texture feature

【收稿日期】2021-10-14

【基金项目】上海市自然科学基金(19ZR1421500);国家自然科学基金青年基金(81101105)

【作者简介】牛广利, 硕士, 研究方向: 医学图像处理, E-mail: 13526501792@163.com

【通信作者】刘翔, 博士, 副教授, 主要研究方向: 计算机视觉与人工智能, E-mail: xliu@sues.edu.cn

前言

肝硬化是临床常见的慢性进行性肝病, 约有20%~30%的慢性乙肝患者, 由于自身并无不适感, 导致延误诊断与治疗, 最终发展为不可逆的重度肝硬化甚至肝癌。在对肝硬化、肝纤维化的临床筛查与随访中, 超声成像技术以其无创、实时、便捷、无辐射的优势成为诊断肝硬化、肝纤维化的重要手段之

—^[1]。随着计算机技术和数字图像分析技术的不断发展,计算机辅助的非介入性诊断技术广泛应用于医学领域,尤其在医学影像领域^[2-7]。本文将利用计算机辅助诊断技术对乙型肝炎肝硬化患者的高频超声图像进行分析,自动提取肝实质纹理特征信息,量化检测病变特征数据,克服人为判断的主观性与模糊性。

1 资料与方法

1.1 资料

本研究所使用的图像数据均来自第二军医大学长征医院超声科,其中包括男性患者35例,女性患者12例,年龄28~77岁,平均年龄(51.6±11.6)岁。依据Child-Pugh改良分级标准将肝硬化患者的肝功能损害程度分为A、B、C三级,定义A级为轻度肝硬化组,共18例,年龄31~71岁,平均年龄(50.1±10.1)岁;B级为中度肝硬化组,共16例,年龄28~67岁,平均年龄

(50.8±11.0)岁;C级为重度肝硬化组,共13例,年龄33~77岁,平均年龄(55.3±14.7)岁。除此之外,选取经超声、实验室检查均无肝脏疾病者20名,作为正常对照组,其中男性15名,女性5名,年龄26~76岁,平均年龄(51.5±13.2)岁。肝硬化病情诊断结果经实验室、超声、CT检查证实,排除合并脂肪肝、血吸虫肝病及其他器质性肝脏疾病患者,各组间年龄、性别、体质质量指数等差异均无统计学意义。

1.2 方法

在高频超声图像中,由于其特殊的成像原理导致空间域图像受到噪声的干扰较大,不利于计算机辅助诊断的进行,而频率域下的图像能够有效避免这一干扰。传统的图像处理方式对此处理能力较差,而滤波处理在该领域具有更大的优势。因此本文将采取快速傅里叶变换(FFT)与图像处理技术相结合的方式对肝脏图像进行处理分析,统计肝实质病变数据,流程图如图1所示。

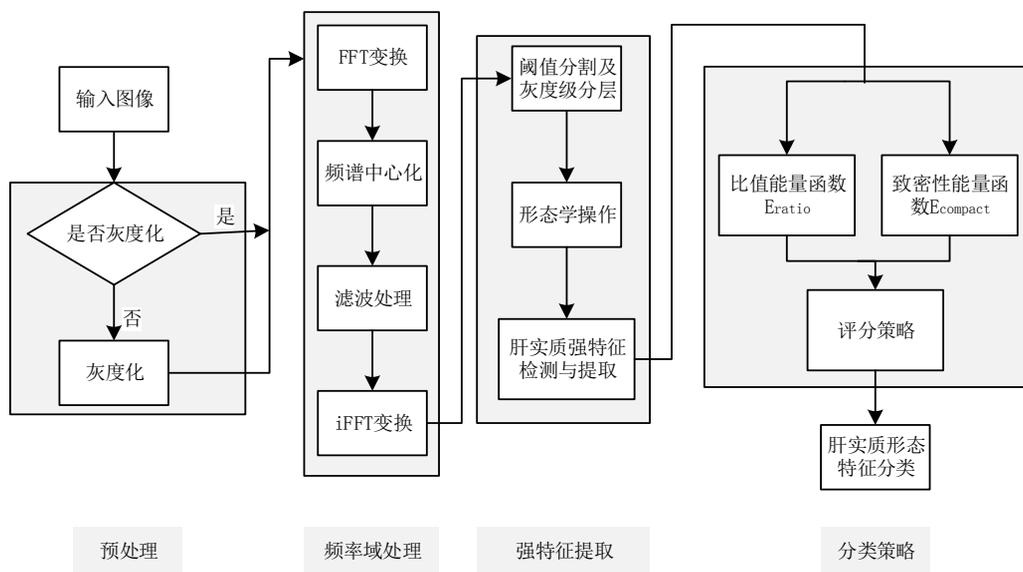


图1 方法总流程图

Figure 1 General flowchart of the proposed method

1.2.1 频率域处理 FFT的主要作用是实现空间域信号与频率域信号间的转换^[8]。将一幅尺寸为 $M \cdot N$ 的肝脏超声图像 $F(x, y)$ 先进行灰度化,得到的图像记为 $G(x, y)$,对其进行FFT,如式(1)所示:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} G(x, y) \exp[-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})] \quad (1)$$

得到的 $F(u, v)$ 所在的坐标系即为频域,由 $u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ 和 $v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ 定义的 $M \cdot N$ 矩阵常称为频域矩阵。

通过FFT得到的频谱图一般呈现中间高频、四角低频的分布形态。频谱图的中心区域代表低频分

量,从中心往外,频率越高,能量越低。空间域上变化比较剧烈的信号主要集中于边界或灰度级的突变(如噪声),反映图像的细节。变化比较缓慢的信号主要集中于边界内部的景物信息中,反映图像的概貌。为利于对频谱分析和滤波操作,根据式(2)实现频谱中心化:

$$\xi[f(x, y)(-1)^{x+y}] = F(u - \frac{M}{2}, v - \frac{N}{2}) \quad (2)$$

经过频谱中心化后的频谱图以图像中心点呈发散状态分布,根据其特性,设计理想高通滤波器,如公式(3)所示,实现对图像的滤波操作,强化边缘信息,弱化概貌信息。

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & D(u, v) \leq D_0 \\ 1, & D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, D_0 表示通带的半径, $D(u, v)$ 表示频域中点 (u, v) 与中心点 $(M/2, N/2)$ 的欧氏距离, 如式(4)所示:

$$D(u, v) = \sqrt{(u - \frac{M}{2})^2 + (v - \frac{N}{2})^2} \quad (4)$$

由于图像数据尺寸大小不同, 需要依据图像本

身的信息自动确定符合图像的截止频率。为了有效去除低频信号, 尽可能多地保留高频信息, 本文使用图像自身尺寸的 1/8、1/12、1/16 作为截止频率, 实验效果如图 2 所示。从图中发现图像自身尺寸的 1/12 的截止频率在保留图像主要特征情况下, 强化了特征边缘, 因此本文将采用图像自身尺寸的 1/12 为高通滤波的截止频率。

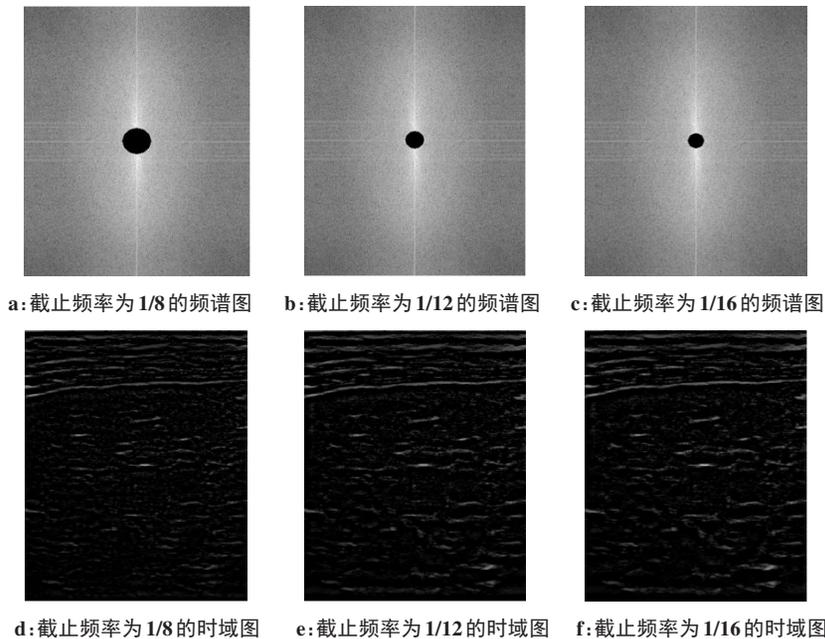


图2 不同截止频率下效果图

Figure 2 Frequency spectra and time domain diagrams at different cut-off frequencies

经过高通滤波器处理后的频谱图实现了截断低频信息, 保留高频信息, 实现凸显边缘特征的效果, 最后进行傅里叶逆变换 (IFFT), 如式(5)所示, 对处理后的图像数据形象化显示。

$$D(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M \cdot N}} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} F'(u, v) \cdot \exp[j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})] \quad (5)$$

其中, $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ 和 $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ 。

1.2.2 肝实质强特征提取 为实现对肝实质强特征的提取, 本文根据图像的像素值分布情况对肝实质特征进行阈值分割, 并进行灰度级分层操作, 保留成像明显的肝实质特征。由于弱肝实质特征极大程度会影响特征的量化检测与提取工作, 采用十字结构卷积结构 (如图 3 所示) 对肝超声图像进行开操作处理。开操作是由腐蚀和膨胀两个运算组成, 先进行腐蚀运算, 后进行膨胀运算, 实现消除弱特征的同时, 保留强特征, 其腐蚀、膨胀运算如公式(6)、(7)所示。

$$D(x, y) = \min_{(x', y') : \text{element}(x', y') \neq 0} \text{src}(x+x', y+y') \quad (6)$$

$$D(x, y) = \max_{(x', y') : \text{element}(x', y') \neq 0} \text{src}(x+x', y+y') \quad (7)$$

0	1	0
1	1	1
0	1	0

图3 十字结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of the cross structure

1.2.3 特征量化检测与提取 对肝实质病变特征进行轮廓检测, 病变特征定位, 并对肝实质特征, 如颗粒状、条索状等进行链式轮廓检测并绘制其最小外接矩形从而得到肝实质特征数据, 并采用比值能量函数 E_{ratio} 与致密性能量函数 E_{compact} 实现对颗粒、细条索、粗条索分类:

$$E_{\text{ratio}} = \text{Exp}(\frac{\text{length}}{\text{width}} - \bar{r}) \quad (8)$$

$$E_{\text{compact}} = \text{Exp}(\frac{\text{length}^2}{\text{area}} - \bar{c}) \quad (9)$$

其中, $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{length}}{\text{width}}$, $\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{length}^2}{\text{area}}$, n 为所检测到的特征个数之和。能量函数利用指数函数特性, 以及肝实质特征分布情况, 实现对颗粒、细条索、粗条

索进行能量扩大,从而实现特征的分类。

根据孟繁坤^[9]提出的分类方法,对肝实质形态特征进行细分为5类,评分策略如公式(10)所示:

$$\text{score} = \begin{cases} 1, & \text{粗颗粒} \\ 2, & \text{粗颗粒} + \text{细条索} \\ 3, & \text{细条索} \\ 4, & \text{细条索} + \text{粗条索} \\ 5, & \text{粗条索} \end{cases} \quad (10)$$

1.3 统计学分析

利用SPSS23.0统计分析软件对肝实质特征数据进行统计分析,计量资料使用均值±标准差表示,多

组间比较采用单因素方差分析,如果差异具有统计学意义,再利用Dunnett T_3 法对各组进行多重比较。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 不同组别肝实质特征量化检测

本研究针对不同阶段的肝硬化超声图像的病理特征,将FFT与图像形态学处理相结合的方式实现对肝实质病变特征精准检测,并采取链式外部轮廓检测策略对病变特征数据实现量化提取并分析,如图4所示。

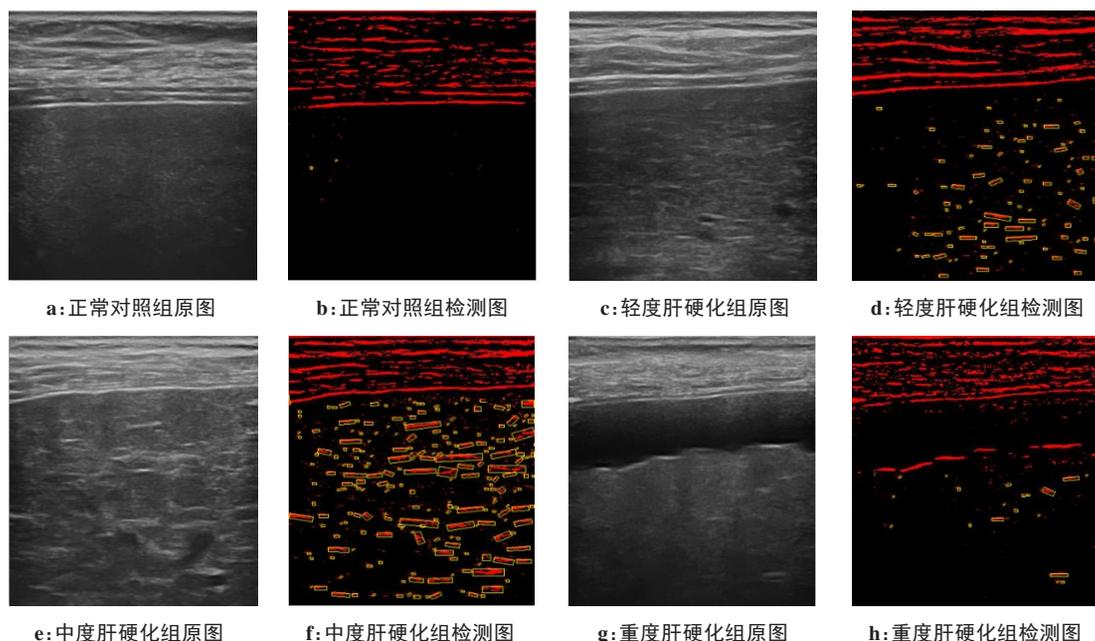


图4 不同阶段肝硬化患者二维高频超声图及相应肝实质病变特征检测图

Figure 4 Two-dimensional high-frequency ultrasound images and the corresponding parenchymal lesions in patients with different stages of cirrhosis

2.2 不同组别肝实质特征量化数据统计分析

根据评分策略对肝实质形态特征进行统计(表1)、单因素方差分析(表2),根据上述结果,该数据特征在轻度、中度、重度肝硬化组、正常对照组差异具有统计学意义($P < 0.001$);在多重比较中,与正常对照组比较,组间差异均具有统计学意义,与轻度、中度肝硬化组比较,除重度肝硬化组组间差异不显著外,其余均具有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨论

时域分析与频域分析是对同一信号(图像)的两个观察面,时域分析是以时间轴为坐标表示的动态信息的关系,而频域分析是把信号变为以频率轴为坐标表示出来^[10]。从时域角度分析,自然界的所有图像都是由微观世界中的不同图像基元组合而成,

当某种基元呈规律性出现或随机重复性出现时,便会形成图像的纹理结构,表现得较为形象和直观。而从频域角度分析,任何连续周期信号都是由多个具有不同幅度和不同相位的正弦波组合而成,图像的清晰度和分辨率与频域中的某些量相关,因此可

表1 基于评分策略的肝实质特征统计数据

Table 1 Statistical data of liver parenchymal characteristics based on scoring strategy

组别	n	评分策略				
		1	2	3	4	5
正常对照组	20	15	5	0	0	0
轻度肝硬化组	18	2	6	5	3	2
中度肝硬化组	16	2	0	1	5	8
重度肝硬化组	13	2	0	5	4	2

表2 基于评分策略对肝实质特征的ANOVA检验

组别	<i>n</i>	均值	标准差
正常对照组	20	1.25	0.44
轻度肝硬化组	18	2.83	1.20
中度肝硬化组	16	4.06	1.34
重度肝硬化组	13	3.31	1.25
<i>F</i> 值		21.787	
<i>P</i> 值		<0.001	

通过频域的角度实现分辨率的提高^[11]。在图像处理的某些领域中,频域分析则会显得更为简练,剖析问题也更为深刻和方便。

医学超声图像主要依靠生物组织中的组织特性、组织几何尺寸的差异性特征,以及超声波在生物组织内的传播规律等特性进行病变特征的诊断。当超声波在生物组织内传播时,超声波遇到不同的组织结构会有透射、反射、绕射、散射及干扰等传播规律和波动现象的产生,最终形成不同的回声现象,如当超声波遇到小于波长的细微组织就会发生散射,散射波之间相互干扰,最终形成许多颗粒状结构,其进行周期性叠加或者排列形成超声波图像的纹理结构^[12]。根据超声图像的成像原理,超声波反射回来的图像对病理特征会存在一定的颗粒干扰,不利于医学诊断。计算机纹理分析技术可提供更加准确、突出的纹理特征,使超声影像量化分析存在可能。

肝实质纹理特征是诊断肝硬化病情重要的特征之一。目前,已有很多学者针对肝纤维化、肝硬化纹理做了较多研究,其对肝实质特征的提取主要方法有采用机器学习思想,计算机缺陷检测法定位病变特征、灰度共生矩阵、小波变换及局部二值模式、多分辨率小波包、M-Band小波变换和Gabor小波相结合等,但计算机技术对超声图像的处理仍具有一定的局限性,如如何从众多干扰中提取出符合医生视角的病变特征等^[13-15]。本研究通过强化肝实质病变特征,弱化干扰性特征,实现量化提取出病变特征数据,避免主观判定,实现客观分析。

本研究通过FFT将肝实质图像直观的时域信号转换成更为简练的频域信号,根据每幅图像本身的尺寸特性设计独有的高通滤波器,并作用于频谱图,实现对图像边界的纹理信息的强化,IFFT实现了频谱图到时域图的转换,使图像更加直观、形象,其次,通过形态学处理方法对重构图进行处理,实现对纹

理病理特征的强化以及干扰性特征的弱化效果,量化检测出肝实质病变数据并进行特征尺寸特征统计。将肝实质形态特征细化为粗颗粒、粗颗粒+细条索、细条索、细条索+粗条索、粗条索5级,同时,依据此评分策略对4个不同阶段的肝硬化进行统计学分析,均具有统计学意义。在多重比较中,与重度肝硬化组比较,肝实质形态特征差异并不具备统计学意义。究其原因,可能重度肝功能不全时,导致肝实质部位形态特征不明显,但此时极大可能产生腹腔积液等比较明显的特征,因此判定重度肝硬化可以结合肝包膜特征、是否存在腹腔积液等特征进行综合判定。目前已有研究肝硬化的学者通过充分挖掘肝脏影像图像中的病变特征数据,如肝包膜特征连续性、平滑性、腹腔积水等特征数据,实现对肝硬化病情综合评定^[16-21]。Wang等^[22]通过整合肝包膜几何特征与肝实质的纹理特征的方式,尝试不同的分类器以筛选出非侵入性评估肝硬化的量化参数,通过量化特征参数以评估不同程度的肝硬化。对肝硬化特征进行综合量化提取,筛选出符合医生视角的病变特征,并实现其特征的数据化,利用机器学习等方法实现对肝硬化的分级诊断将更具有客观性与准确性。

【参考文献】

- [1] 翟岳仙,刘翔,宋家琳,等.基于超声的计算机辅助诊断肝纤维化研究进展[J].中国医学影像技术,2019,35(7):1107-1110.
ZHAI Y X, LIU X, SONG J L, et al. Progress in ultrasound-based computer-assisted diagnosis of liver fibrosis[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2019, 35(7): 1107-1110.
- [2] 刘士远,萧毅.基于深度学习的人工智能对医学影像学的挑战和机遇[J].中华放射学杂志,2017,51(12):899-901.
LIU S Y, XIAO Y. Challenges and opportunities of deep learning-based artificial intelligence for medical imaging[J]. Chinese Journal of Radiology, 2017, 51(12): 899-901.
- [3] LITJENS G, KOOI T, BEJNORDI B E, et al. A survey on deep learning in medical image analysis[J]. Med Image Anal, 2017, 42: 60-88.
- [4] SETIO A A, CIOMPI F, LITJENS G J, et al. Pulmonary nodule detection in CT images: false positive reduction using multi-view convolutional networks[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2016, 35(5): 1160-1169.
- [5] HAVAEI M, DAVY A, WARDEFARLEY D, et al. Brain tumor segmentation with deep neural networks[J]. Med Image Anal, 2017, 35: 18-31.
- [6] 周榴,董怡,夏威夷,等.基于超声影像组学的原发性肝细胞癌分级预测[J].中国医学物理学杂志,2020,37(1):59-64.
ZHOU L, DONG Y, XIA W, et al. Prediction of grade of hepatocellular carcinoma by radiomics based on ultrasound[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(1): 59-64.
- [7] 吴秀明,王霞丽,吕国荣,等.计算机辅助系统在诊断乳腺良恶性肿瘤中的应用[J].中国医学物理学杂志,2020,37(3):374-378.
WU X M, WANG X L, LÜ G R, et al. Application of computer-aided detection in ultrasound diagnosis of benign and malignant breast tumors[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(3): 374-378.
- [8] NAHARI R V, PUTRO S S, SETIAWAN N, et al. Detecting text in the scene text image using fast Fourier transform[J]. J Phys, 2020, 1569: 032070.

- [9] 孟繁坤, 丁蕾, 曲猛, 等. 高频超声观察肝实质形态的改变对慢性肝病肝纤维化分期的价值[J]. 中国医学影像技术, 2006, 22(6): 916-918. MENG F K, DING L, QU M, et al. The value of high-frequency ultrasound for the staging of liver fibrosis in chronic liver disease with morphological changes in liver parenchyma[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2006, 22(6): 916-918.
- [10] 张淑杰, 张维维, 奚云琪, 等. 基于傅里叶变换的心电信号频谱分析[J]. 信息系统工程, 2012(1): 133-134. ZHANG S J, ZHANG W W, XI Y Q, et al. Spectrum analysis of ECG signals based on Fourier transform [J]. Information Systems Engineering, 2012(1): 133-134.
- [11] WANG L, QIAN Y, WANG H. Objective evaluation of the resolution of low-light-level image intensifiers based on fast Fourier transform [J]. Opt Eng, 2020, 59(5): 054106.
- [12] MIZUNO R, FUJIMOTO S, YAMAJI K, et al. Myocardial ultrasonic tissue characterization for estimating histological abnormalities in hypertrophic cardiomyopathy: comparison with endomyocardial biopsy findings[J]. Cardiology, 2001, 96(1): 16-23.
- [13] 宋家琳, 刘翔, 章建全, 等. 高频超声肝实质纹理特征定量评价肝硬化患者肝功能[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(12): 1875-1879. SONG J L, LIU X, ZHANG J Q, et al. Quantitative evaluation of liver function in cirrhotic patients by high-frequency ultrasound of liver parenchyma texture features[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2019, 35(12): 1875-1879.
- [14] VIRMANI J, KUMAR V, KALRA N, et al. SVM-based characterisation of liver cirrhosis by singular value decomposition of GLCM matrix [J]. Int J Artif Intell Soft Comput, 2013, 3(3): 276.
- [15] LEE W L. An ensemble-based data fusion approach for characterizing ultrasonic liver tissue[J]. Appl Soft Comput, 2013, 13(8): 3683-3692.
- [16] LIU X, ZHAN Z, YAN M, et al. Computer-aided cirrhosis diagnosis via automatic liver capsule extraction and combined geometry-texture features [C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2017: 865-870.
- [17] ZHAO J, WANG S H, LIU X, et al. Early diagnosis of cirrhosis via automatic location and geometric description of liver capsule[J]. Vis Comput, 2017(9963): 1-13.
- [18] LIU X, SONG J L, WANG S H, et al. Learning to diagnose cirrhosis with liver capsule guided ultrasound image classification[J]. Sensors, 2017, 17(1): 149.
- [19] LIU X, SONG J L, ZHAO J W, et al. Extracting and describing liver capsule contour in high-frequency ultrasound image for early HBV cirrhosis diagnosis [C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2016: 1-6.
- [20] 宋家琳, 刘翔, 章建全, 等. 高频超声影像肝脏包膜几何特征定量评价患者肝硬化程度[J]. 中国医学影像技术, 2015, 31(12): 1907-1910. SONG J L, LIU X, ZHANG J Q, et al. High-frequency ultrasound imaging of liver envelope geometric features for quantitative evaluation of the degree of liver cirrhosis in patients [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2015, 31(12): 1907-1910.
- [21] LIU Y, LIU X, WANG S, et al. A novel method for accurate extraction of liver capsule and auxiliary diagnosis of liver cirrhosis based on high-frequency ultrasound images [J]. Comput Biol Med, 2020, 125: 104002.
- [22] WANG S H, LIU X, ZHAO J, et al. Learning to diagnose cirrhosis via combined liver capsule and parenchyma ultrasound image features [C]//IEEE International Conference on Bioinformatics & Biomedicine. IEEE, 2016: 799-804.

(编辑: 黄开颜)