

✧ 医学物理与工程学

Impact of singular value decomposition filter combined with Frangi filter on image quality of superb microvascular imaging

HU Haiman^{1,2,3}, LEI Yumeng², YU Jing², WANG Qi², LEI Bingsong², YE Huarong², ZHANG Ge^{1,2*}

(1. Department of Cardiovascular Medicine, Wuhan Asia Heart Hospital, Wuhan 430022, China;

2. Department of Ultrasound Medicine, China Resources & Wisco General Hospital,

Wuhan 430080, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

[Abstract] **Objective** To observe the impact of singular value decomposition (SVD) filter combined with Frangi filter on image quality of superb microvascular imaging (SMI). **Methods** Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) was performed in a phantom and a patient with suspected liver hemangioma. Images in group A were processed with SVD filter, while in group B, C and D with Frangi filter, Frangi+SVD filter and SVD+Frangi filter, respectively, then image quality of SMI were compared. **Results** Contrast-to-tissue ratio (CTR), contrast-to-noise ratio (CNR) and signal-to-noise ratio (SNR) of A, B, C and D group were all higher than those of original CEUS images. Compared with the original CEUS images, the image quality indexes and image resolution of group D were most significantly improved, with CTR, CNR and SNR increased by 58.04, 3.39 and 48.04 dB of the phantom, as well as increased by 61.85, 16.80 and 49.67 dB of the patient, respectively. The resolution of the phantom's and the patient's SMI images was 1.42 times and 1.98 times of the original CEUS images, respectively. **Conclusion** SVD filter combined with Frangi filter could effectively improve image quality of SMI.

[Keywords] hemangioma; ultrasonography; image quality; singular value decomposition; Frangi filter

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.03.023

奇异值分解滤波联合 Frangi 滤波对超微血管成像图像质量的影响

胡海曼^{1,2,3}, 雷雨蒙², 余靖², 王琦², 雷炳松², 叶华容², 张舸^{1,2*}

(1. 武汉亚洲心脏病医院心血管内科, 湖北武汉 430022; 2. 华润武钢总医院超声医学科,

湖北武汉 430080; 3. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北武汉 430068)

[摘要] **目的** 观察奇异值分解(SVD)滤波联合 Frangi 滤波对超微血管成像(SMI)图像质量的影响。**方法** 分别对 1 具仿体及 1 例疑诊肝血管瘤患者行 CEUS, 分别以 SVD 滤波(A组)、Frangi 滤波(B组)、Frangi+SVD 滤波(C组)及 SVD+Frangi 滤波(D组)处理图像, 之后比较不同图像的质量。**结果** 4 组仿体及人体肝脏 SMI 对比组织比(CTR)、对比度噪声比(CNR)及信噪比(SNR)均高于原始 CEUS 图像。相比原始图像, D 组图像质量及分辨率提升最为显著, 仿体 SMI 的 CTR、CNR 及 SNR 分别提升 58.04、3.39 及 48.04 dB, 人体肝脏 SMI 相应参数则分别提升 61.85、16.80 及 49.67 dB, 而分辨率分别为原始 CEUS 图像的 1.42 倍及 1.98 倍。**结论** SVD 滤波联合 Frangi 滤波可有效提高 SMI 图像质量。

[关键词] 血管瘤; 超声检查; 图像质量; 奇异值分解; Frangi 滤波器

[中图分类号] R735.7; R445.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2024)03-0430-06

[基金项目] 湖北省自然科学基金青年项目(2023AFB289)。

[第一作者] 胡海曼(2003—), 女, 湖北武汉人, 在读本科。研究方向: 医学图像处理。E-mail: huhaiman@hbut.edu.cn

[通信作者] 张舸, 武汉亚洲心脏病医院心血管内科, 430022; 华润武钢总医院超声医学科, 430080。E-mail: 451170880@qq.com

[收稿日期] 2023-11-21 **[修回日期]** 2023-12-28

微血管网络对于恶性肿瘤局部侵袭及远处转移具有重要作用^[1-2]。彩色多普勒和能量多普勒超声为临床常用血流检测技术,但成像质量易受低频区域及运动信号等因素影响。借助于多尺度血管增强滤波器,基于 Hessian 矩阵的 Frangi 滤波可在图像中增强血管结构并抑制非血管结构,但直接用于超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)较低,且易将组织信号误判为血流信号^[3-5]。奇异值分解(singular value decomposition, SVD)滤波可利用信号的时空相干性区分微血管血流与组织,同时显著抑制 CEUS 图像中的杂波降低对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR),以提高图像质量^[6-9]。本研究观察 SVD 滤波联合 Frangi 滤波对超声微血管成像(superb microvascular imaging, SMI)图像质量的影响。

1 资料与方法

1.1 数据来源与仪器方法 于 1 具 4% 琼脂仿体内嵌入内径 280 μm 的硅胶管,并向其中注入 0.5 ml 声诺维(Bracco)。采用 Verasonics Vantage 超声系统、频率 7.8 MHz 的 L15 线阵探头对仿体行 CEUS。另前瞻性选取 2021 年 11 月华润武钢总医院 1 例男性 32 岁疑诊肝血管瘤患者,以 Mindray Resona R9T 超声诊断仪、频率 2.5 MHz 的 SC6-1U 凸阵探头、机械指数 0.1 行 CEUS。嘱患者仰卧,由 2 名具有 15 年以上超声诊断经验的主任医师采集肝脏常规二维超声图像,适当选择病灶切面,之后经肘静脉团注声诺维(Bracco)0.5 ml,以高帧频模式(帧率 41 Hz)采集 250 帧 CEUS 图像。本研究经院伦理委员会批准(CRWG2023R028),检查前患者签署知情同意书。

1.2 SVD 滤波预处理 对仿体及人体肝脏 CEUS 图像进行数据转换,生成二维 Casorati 时空矩阵 A ($N_x \times N_z, N_t$),每行(即 $N_x \times N_z$)代表 1 帧图像、每列(即 N_t)代表 1 帧数据。以 SVD 滤波分解矩阵 A ,获得空间奇异向量矩阵 U 、对角矩阵 S 及时间奇异向量矩阵 V_1 ,见公式(1):

$$A=U \times S \times V_1^* \quad (1)$$

其中,*代表转置矩阵。

将奇异值(即对角矩阵 S 的特征值)按降序排列,绘制奇异值信号强度能量曲线,分别以其 2 个拐点为组织阈值(T_1)和噪声阈值(T_2):将高于 T_1 的奇异值视为组织背景信号、低于 T_2 者视为背景噪声信号,滤除组织背景信号及背景噪声信号后,保留 T_1 与 T_2 之间的最佳 CEUS 信号。经上述处理后,仿体 CEUS 图

像 $T_1=1$ 、 $T_2=2$,人体肝脏 CEUS 图像 $T_1=50$ 、 $T_2=250$;分别将 $<T_1$ 及 $>T_2$ 的奇异值设为 0;根据公式(2)计算重构图像矩阵 I :

$$I=U \times S \times V_2^* \quad (2)$$

其中,*代表转置矩阵。

1.3 Frangi 滤波提取血管结构 将图像矩阵 I 像素点 (x, y) 处的 Hessian 矩阵记为 H ,其二阶偏导数组成见公式(3);由于图像中血管直径存在变化,不宜采用单一尺度增强,故以高斯滤波器相应二阶导数进行卷积,获得血管尺度因子 σ ,见公式(4)~(7):

$$H = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{xy} & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$I_{xx} = I(x, y) \otimes \frac{\partial^2 G(x, y, \sigma)}{\partial^2 x} \quad (4)$$

$$I_{yy} = I(x, y) \otimes \frac{\partial^2 G(x, y, \sigma)}{\partial^2 y} \quad (5)$$

$$I_{xy} = I(x, y) \otimes \frac{\partial^2 G(x, y, \sigma)}{\partial x \partial y} \quad (6)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

其中, $I(x, y)$ 代表图像矩阵 I 在 (x, y) 处的灰度值, $G(x, y, \sigma)$ 为高斯函数, \otimes 代表卷积运算。

将 Hessian 矩阵特征值分解为特征值 λ_1 及 λ_2 ,其中幅值较大者对应的特征向量代表该点曲率最大方向;构建比率模型,根据公式(8)计算主比率变量 R_b ,以区分 CEUS 图像中管状及块状结构;构造血管增强响应函数 $V(\sigma)$,其中 S 代表 Hessian 矩阵的 Frobenius 常数, β 、 c 分别为 R_b 和 S 的灵敏度阈值,见公式(9)~(10):

$$R_b = |\lambda_1| / |\lambda_2| \quad (8)$$

$$V(\sigma) = \begin{cases} 0, & \lambda_2 > 0 \\ \exp\left[-\frac{R_b^2}{2\beta^2}\right] \left[1 - \exp\left[-\frac{S^2}{2c^2}\right]\right], & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} \quad (10)$$

对血管尺度因子 σ 进行迭代,并以该尺度最大血管增强响应函数值 $V_{\max}(\sigma)$ 作为当前点的输出值,见公式(11)。通过设置最小尺度 σ_{\min} 及最大尺度 σ_{\max} 调整 λ_1 及 λ_2 覆盖宽度范围并获得输出图像; λ_2 为负值时,血管结构灰度值应高于背景区域; λ_2 为正值时,血管结构灰度值应低于背景区域;某像素点 $\lambda_2 > \lambda_1$ 代表其近为细长管状结构;某像素点 λ_1 与 λ_2 无相关代表其附近均位于背景区域,将增强函数赋值为 0。见图 1 及表 1。

$$V = V_{\max}(\sigma), \sigma_{\min} \leq \sigma \leq \sigma_{\max} \quad (11)$$

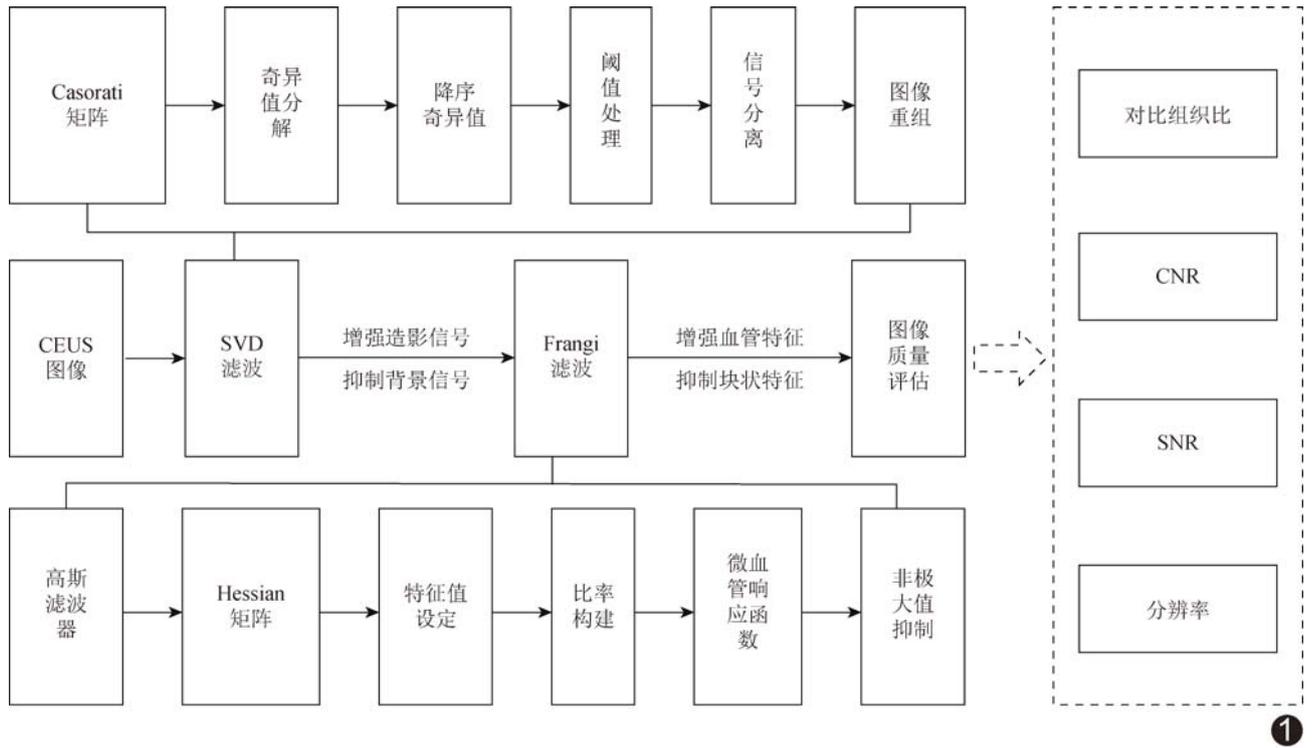


图 1 SVD 滤波联合 Frangi 滤波的超微血管成像流程图

表 1 CEUS 图像中不同模式的 Hessian 特征值

λ_1	λ_2	模式
噪声	噪声	均不合适
L	H-	管状结构(灰度高)
L	H+	管状结构(灰度低)
H-	H-	块状结构(灰度高)
H+	H+	块状结构(灰度低)

注:绝对值相对大记为 H、相对小记为 L, +/- 代表正负性

1.4 评价图像质量指标 根据公式(12)~(14)计算图像对比组织比(contrast-to-tissue ratio, CTR)、CNR 及 SNR,以评价经 SVD 滤波(A 组)、Frangi 滤波(B 组)、Frangi+SVD 滤波(C 组)及 SVD+Frangi 滤波(D 组)处理后的 SMI 图像质量。

$$CTR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{对比}}}{A_{\text{组织}}} \right) \quad (12)$$

$$CNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{对比}} - A_{\text{组织}}}{\sqrt{\sigma_{\text{对比}}^2 - \sigma_{\text{组织}}^2}} \right) \quad (13)$$

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{对比}}}{\sigma_{\text{组织}_e}} \right) \quad (14)$$

其中, $A_{\text{对比}}$ 及 $A_{\text{组织}}$ 分别代表对比及组织区域内信号平均像素值, $\sigma_{\text{对比}}$ 及 $\sigma_{\text{组织}}$ 分别代表对比及组织区域内信号标准差。

绘制选定区域信号强度曲线,根据公式(15)计算半峰全宽(full width at half maxima, FWHM),获得

该区域仿体管或肝脏微血管直径,即图像分辨率。

$$FWHM = X_1 |_{f_{\text{max}}/2} - X_2 |_{f_{\text{max}}/2} \quad (15)$$

其中, X_1 及 X_2 分别为曲线峰值 1/2 处的横坐标, f_{max} 为曲线峰值。

2 结果

2.1 显示仿体图像 相比原始 CEUS 图像, A 组仿体顶部和底部噪声被轻度抑制,但仍存在近场组织残留; B 组管状结构增强且成像较完整,非管状结构部分增强; C 组管状结构成像不完整,部分管体结构被显著抑制; D 组管状结构显著增强、非管状结构被显著抑制。见图 2。

2.2 显示人体肝脏 相比原始 CEUS 图像, A 组背景噪声被轻度抑制,血流信号轻度增强,但部分移动缓慢的血流信号因被判定为组织噪声信号而被滤除,血管网络较完整; B 组部分噪声信号被误判为血流信号,非血管结构显著增强; C 组非血管结构被轻度抑制,血管结构轻度增强; D 组血管网络显著增强且显像更完整,图像质量明显改善。见图 3。

2.3 评价图像质量 4 组仿体及人体肝脏 SMI 的 CTR、CNR 及 SNR 均高于原始 CEUS 图像。D 组仿体 SMI 的 CTR、CNR 及 SNR 较原始 CEUS 图像分别提升 58.04、3.39 及 48.04 dB,较 A 组分别提升 47.87、3.93 及 39.17 dB,较 B 组分别提升 9.47、1.30 及 2.05 dB,较 C 组分别提升 49.42、3.71 及 42.8 dB;

D 组人体肝脏 SMI 图像的 CTR、CNR 及 SNR 较原始 CEUS 图像分别提升 61.85、16.80 及 49.67 dB, 较 A 组分别提升 57.99、11.49 及 36.23 dB, 较 B 组分别提升 16.13、1.50 及 9.00 dB, 较 C 组分别提升 59.83、13.69 及 48.65 dB。见表 2。

4 组 SMI 图像中, D 组显示仿体管径及肝脏血管最细, 分别为 0.28 mm 及 1.12 mm; 且图像分辨率最高, 分别为仿体及人体肝脏原始 CEUS 图像的 1.42 倍及 1.98 倍; B 组与 D 组仿体管分辨率均与金标准一致。见图 4 及表 3。

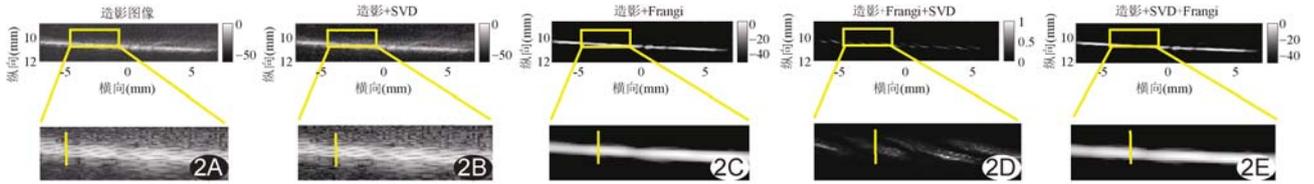


图 2 管状仿体 A~E. 原始 CEUS 图像(A)及 SVD 滤波(B)、Frangi 滤波(C)、Frangi+SVD 滤波(D)及 SVD+Frangi 滤波(E)处理后 SMI 图像 (黄线代表分辨率测量区域)

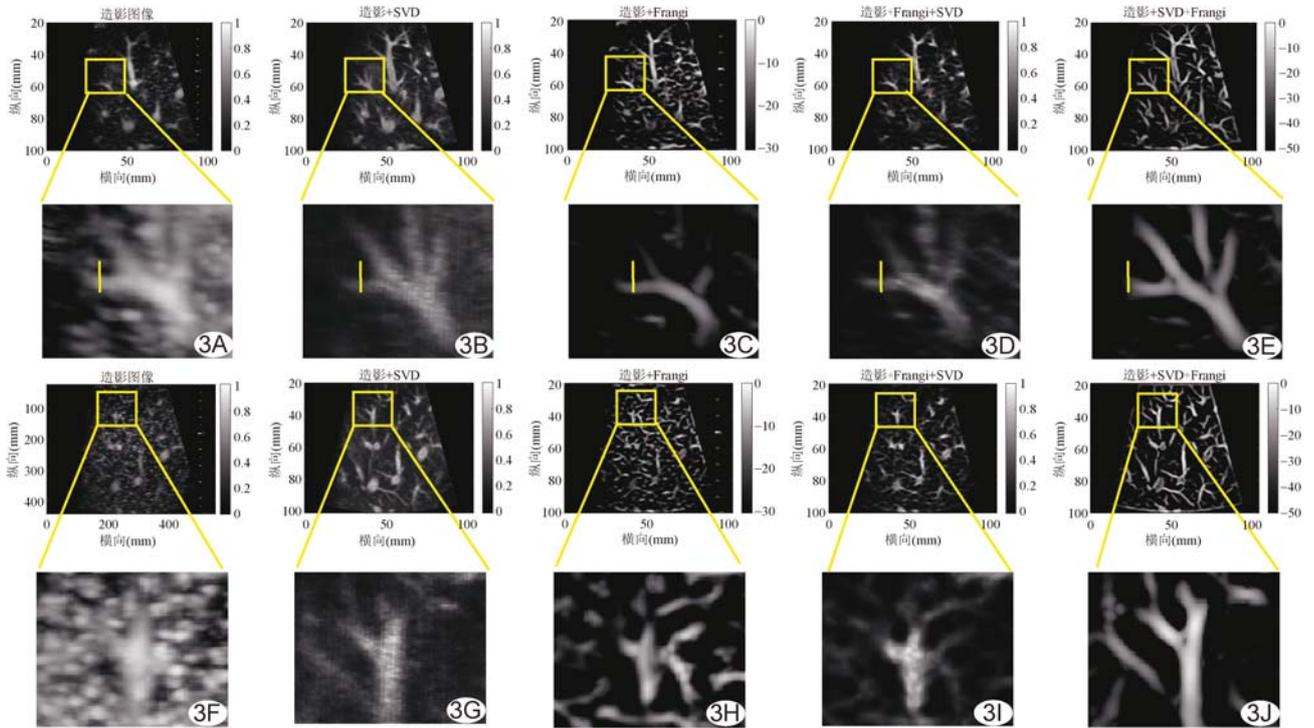


图 3 人体肝脏 A~E. 原始 CEUS 图像(A)及 SVD 滤波(B)、Frangi 滤波(C)、Frangi+SVD 滤波(D)及 SVD+Frangi 滤波(E)处理后 SMI 图像; F~J. 另一层面原始 CEUS 图像(F)及经 SVD 滤波(G)、Frangi 滤波(H)、Frangi+SVD 滤波(I)及 SVD+Frangi 滤波(J)处理后的 SMI 图像 (黄线代表分辨率测量区域)

表 2 仿体及人体肝脏原始 CEUS 图像经不同滤波处理后 SMI 图像质量(dB)

组别	仿体			人体肝脏		
	CTR	CNR	SNR	CTR	CNR	SNR
原始图像	9.50±6.20	5.84±1.35	16.26±1.07	14.39±1.10	7.34±1.15	19.92±2.35
A 组	19.67±1.10	5.30±0.92	25.13±1.01	18.25±2.21	12.65±3.70	33.36±0.86
B 组	58.07±4.01	7.93±1.90	62.25±7.12	60.11±10.46	22.64±18.28	60.59±5.17
C 组	18.12±9.16	5.52±0.33	21.50±4.43	16.41±2.37	10.45±4.35	20.94±5.93
D 组	67.54±2.68	9.23±1.47	64.30±15.24	76.24±10.02	24.14±1.36	69.59±16.34

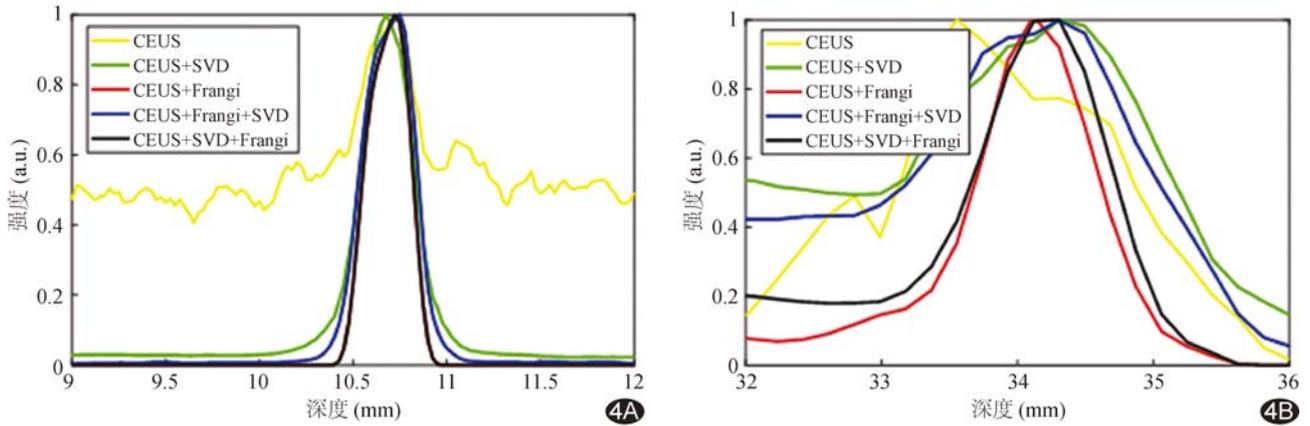


图 4 不同滤波处理后仿体(A)与人体肝脏(B)黄线处 ROI 分辨率 (A、B 图黄线分别对应图 2、3 黄线区域)

表 3 不同滤波处理后仿体管黄线处 ROI 分辨率及误差百分比

参数	CEUS	A 组	B 组	C 组	D 组
分辨率(mm)	0.40	0.29	0.28	0.32	0.28
分辨率误差百分比(%)	42.85	3.57	0	14.28	0

3 讨论

SVD 滤波可通过奇异值序列曲线选取组织残留阈值,降低背景组织信号与噪声信号对 CEUS 图像的影响,并利用不同结构的时空相干性实现信号分离以提高图像 SNR;但如选择阈值不当,易将低速血流信号当作组织信号一并滤除^[10]。基于 Hessian 矩阵的 Frangi 滤波有助于根据线状物体平滑的特点分析其特征值矩阵并建立滤波器,通过迭代尺度因子自适应地提取血管结构^[11-12]。MIRI 等^[13]基于 Frangi 滤波器与形态学重建分割视网膜血管,发现噪声及病变对分割效果均有较大影响。

CEUS 图像 SNR 较低,以 Frangi 滤波自动提取血管存在局限性^[13-14]。SVD 滤波联合 Frangi 滤波可先后于时间域及空间域对 CEUS 图像进行后处理,以弥补单一滤波的不足。本研究对比经 SVD 滤波、Frangi 滤波、Frangi+SVD 滤波及 SVD+Frangi 滤波处理后 SMI 图像质量,结果显示,经 SVD+Frangi 滤波处理后,仿体管状结构显著增强而非管状结构被显著抑制,人体肝脏图像微血管网络显著增强,且图像分辨率最高。CTR、CNR 及 SNR 为评价 CEUS 图像质量的重要参数。CTR 越大代表造影信号越强、ROI 与背景的对比度越高;CNR 越大代表微血管对比度越高;SNR 越大代表检测造影剂敏感度越高。本研究 D 组图像的 CTR、CNR 及 SNR 均明显高于其他 3 组,提示 SVD 滤波联合 Frangi 滤波可显著提高 SMI 图像质量。值得注意的是,

本研究 D 组人体肝脏图像的 CTR、CNR 及 SNR 分别较 C 组提升 59.83、13.69 及 48.65 dB,表明联合应用 SVD 滤波及 Frangi 滤波的先后排序至关重要;应用 SVD 滤波的主要目的在于提升 CEUS 图像的 SNR,加强其后以 Frangi 滤波提取血管结构的能力。

本研究仿体管 CEUS 原始图像经单一 Frangi 滤波及 SVD 联合 Frangi 滤波处理后,图像分辨率误差均为 0,与已知仿体管金标准一致;这是由于 Frangi 滤波对单一管状结构具有良好增强效果,进而导致 SVD 滤波用于 CEUS 原始图像降噪处理的效果并不明显。

综上所述,SVD 滤波联合 Frangi 滤波可有效提高基于 SMI 图像质量,有待后续进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:胡海曼研究实施、撰写文章;雷雨蒙和余靖审阅文章;王琦和雷炳松研究实施;叶华容指导、审阅文章;张舸研究设计、修改文章。

[参考文献]

[1] BURGUIN A, DIORIO C, DUROCHER F. Breast cancer treatments: Updates and new challenges[J]. J Pers Med, 2021, 11(8):808.

[2] HESTER S C, KURIAKOSE M, NGUYEN C D, et al. Role of ultrasound and photoacoustic imaging in photodynamic therapy for cancer[J]. Photochem Photobiol, 2020, 96(2):260-279.

[3] LONGO A, MORSCHER S, NAJAFABABDI J M, et al. Assessment of hessian-based frangi vesselness filter in optoacoustic imaging[J]. Photoacoustics, 2020, 20:100200.

[4] MARCAN M, PAVLIHA D, MUSIC M M, et al. Segmentation of hepatic vessels from MRI images for planning of electroporation-based treatments in the liver[J]. Radiol Oncol, 2014, 48(3):267-281.

- [5] 程慧, 胡海曼, 雷炳松, 等. 奇异值分解滤波对超声造影超微血管成像图像质量的影响[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(1):90-93.
- [6] 李颖超, 刘越, 王涌天. 基于多尺度 Hessian 矩阵和 Gabor 滤波的造影图像冠脉中心线提取[J]. 中国医学影像技术, 2007, 23(1):133-136.
- [7] RÓNASZÉKI A D, DUDÁS I, ZSÉLY B, et al. Microvascular flow imaging to differentiate focal hepatic lesions: The spoke-wheel pattern as a specific sign of focal nodular hyperplasia[J]. Ultrasonography, 2023, 42(1):172-181.
- [8] PIALOT B, AUGÉUL L, PETRUSCA L, et al. A simplified and accelerated implementation of SVD for filtering ultrafast power Doppler images[J]. Ultrasonics, 2023, 134:107099.
- [9] 章希睿, 桑茂栋, 杜宜纲, 等. 奇异值分解滤波器在超声造影成像的应用及性能分析[J]. 应用声学, 2021, 40(1):89-96.
- [10] BARANGER J, AGUET J, VILLEMMAIN O. Fast thresholding of SVD clutter filter using the spatial similarity matrix and a sum-table algorithm[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2023, 70(8):821-830.
- [11] TIAN F, LI Y, WANG J, et al. Blood vessel segmentation of fundus retinal images based on improved frangi and mathematical morphology [J]. Comput Math Methods Med, 2021, 2021:4761517.
- [12] MAHAPATRA S, AGRAWAL S, MISHRO P K, et al. A novel framework for retinal vessel segmentation using optimal improved frangi filter and adaptive weighted spatial FCM[J]. Comput Biol Med, 2022, 147:105770.
- [13] MIRI M S, MAHLOOJIFAR A. Retinal image analysis using curvelet transform and multistructure elements morphology by reconstruction[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2011, 58(5):1183-1192.
- [14] 王静. 影响超声诊断声像图质量的物理因素分析[J]. 数理医药学杂志, 2006, 19(1):81-83.

《中国医学影像技术》被数据库收录及获奖情况

《中国医学影像技术》杂志是由中国科学院主管, 中国科学院声学研究所主办的国家级学术期刊, 被数据库收录及获奖情况如下:

百种中国杰出学术期刊(2011、2012 年)

中国精品科技期刊

CAJ-CD 规范获奖期刊

中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)

中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊

《中文核心期刊要目总览》收录期刊

《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊

科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告收录期刊

临床医学领域(医学影像学)高质量科技期刊分级目录收录期刊

Scopus 数据库收录期刊

荷兰《医学文摘》来源期刊

WHO《西太平洋地区医学索引》(WPRIM)来源期刊

《日本科学技术振兴机构中国文献数据库》(JSTChina)收录期刊