

BACKGROUND & MOTIVATION

微血管形态与组织力学特性是肿瘤等疾病的早期标志物。光声成像(PAI)利用光吸收差异获取高对比度血管结构；剪切波弹性成像(SWE)通过力学响应获取粘弹性参数。

问题：现有研究缺乏从建模→仿真→重建→定量的完整双模态框架。

目标：构建PA/SW联合框架，实现微血管三维重建与粘弹性(G,η)同步定量。

KEY CONTRIBUTIONS

- PA/SW双模态联合仿真** — COMSOL+k-Wave全链条
- 体素场 $vf(x,y,z)$ 驱动** — 任意血管FEM建模
- 256路四侧时间反演** — 微血管专用传感器
- Maxwell互相关** — 同步提取G与η
- 多级SNR验证** — 30dB及以上误差<1.5%，20dB约2.16%

METHODOLOGY

血管建模 → 体素标记 → FEM仿真 → 信号采集 → PA重建 → SW反演 → 噪声验证

阶段	技术内容	工具
A	骨架→体素场; 三种模型	MATLAB
B	压力声学瞬态+固体力学SW	COMSOL
C	PA 256路 / SW 64路传感	LiveLink
D	去DC+Hann→时间反演→包络	k-Wave
E	ROI PSNR/SSIM评估	MATLAB
F	互相关→ $v_s \rightarrow G = \rho v^2, \eta$	MATLAB
G	噪声 $\infty/40/30/20$ dB验证	MATLAB

KEY PARAMETERS

仿真域	600×600×200 μm^3
PA阵列	256ch四侧, $dt=1\text{ns}$
重建网格	$\Delta x=5\mu\text{m}$, 120×120×40
组织	$E=30\text{kPa}$, $\nu=0.49$, $\rho=1080$
血管径	内16 μm / 外24 μm
SW激励	y向谐波机械激励

SENSOR ARRAY CONFIGURATION

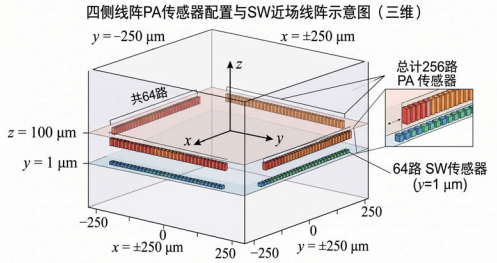


Fig.4 四侧256ch PA线阵(红) + 底面64ch SW线阵(蓝) 三维配置

PA 3D RECONSTRUCTION

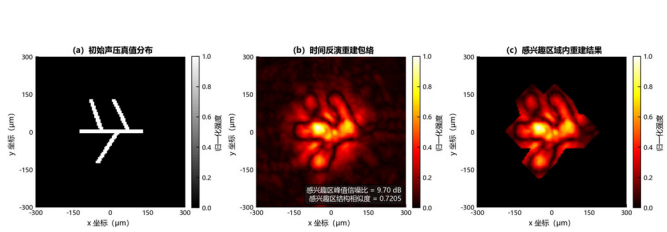


Fig.1 真值MIP / 时间反演重建 / ROI掩膜 (PSNR=9.70dB, SSIM=0.72)

PSNR = 9.70 dB • SSIM = 0.72 (ROI区域)

SW VISCOELASTICITY

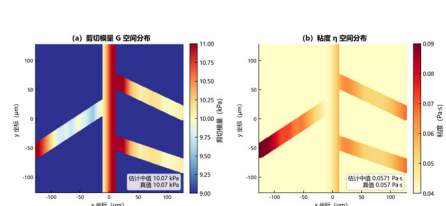


Fig.2 剪切模量G与粘度η空间分布

参数	估计	真值	误差
v_s	3.077m/s	3.054	0.76%
G	9.48kPa	10.07	5.87%
η	0.0534Pa·s	0.057	6.3%

SNR鲁棒性

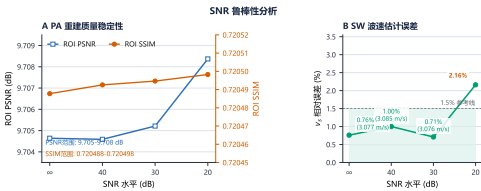


Fig.3 SNR鲁棒性：PA重建稳定 + SW误差趋势 (20dB≈2.16%)

$\infty \rightarrow 20\text{dB}$ 全范围内PA重建质量几乎不变；无噪声至30dB波速误差<1.5%，20dB极端条件下≈2.16%。

VOXEL FIELD MODELING PIPELINE

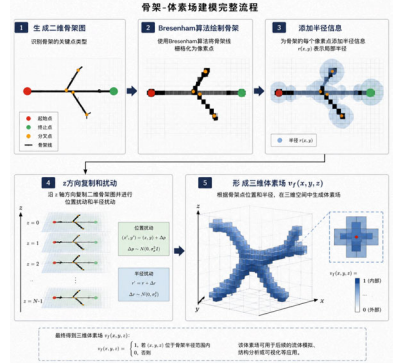


Fig.5 骨架-体素场完整建模流程

Step 1: 生成二维骨架图（节点+连接拓扑）

Step 2: Bresenham算法三维离散化为体素路径

Step 3: 添加半径信息，按内/外径膨胀标记血管腔与壁

Step 4: 八方向复制拓展+生成 $vf(x,y,z)$ 三维体素场

vf 值定义： >1.5 =血管腔($p_0=1\text{kPa}$)， $0.5\sim 1.5$ =血管壁， ≤ 0.5 =背景组织($E=30\text{kPa}$)。该方法解耦几何建模与FEM求解，同一框架适配任意血管拓扑。

3D MICROVASCULAR MODELS

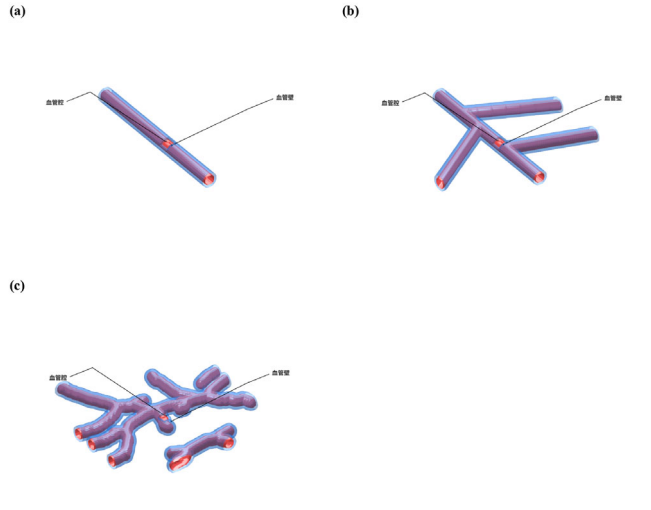


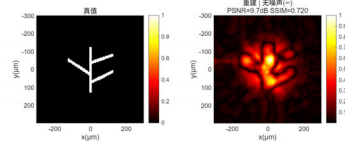
Fig.6 三种复杂度递增的微血管模型

(a) **单管模型：**单根直管，提供解析解参考，验证算法基本正确性。

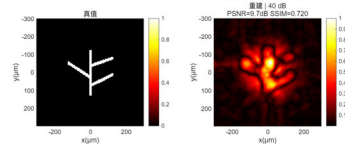
(b) **随机网络：**随机分支拓扑，模拟一般微血管形态复杂度。

(c) **VessMAP真实网络：**源自鼠脑皮层双光子显微数据，具有真实解剖拓扑，验证算法在复杂几何下的性能。

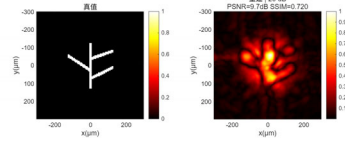
PA RECON VS NOISE LEVEL



∞ dB (无噪声)



40 dB



20 dB (极端)

QUANTITATIVE COMPARISON

SNR	PSNR	SSIM	v _s err
∞	9.70	0.720	0.76%
40dB	≈9.70	≈0.72	<1.5%
30dB	≈9.70	≈0.72	<1.5%
20dB	≈9.70	≈0.72	≈2.16%

ROBUSTNESS MECHANISM

PA: 时间反演=256路相干叠加, 随机噪声相消, 信号相长。等效SNR提升√256≈16倍。

SW: 互相关天然滤波+64路空间平均抑制随机误差。

9.70dB
PSNR

0.72
SSIM

0.76%
v_s err

5.87%
G err

6.3%
η err

≈2.16%
@20dB

SW—维诊断

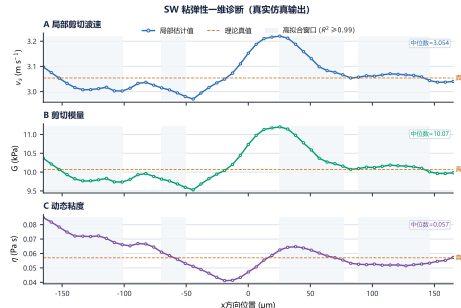


Fig.7 x方向 v_s/G/η—维分布诊断

基于53个局部窗口的真实仿真输出, 展示v_s/G/η沿x方向的空间变化及理论值对照。

SW到达时间-位置拟合

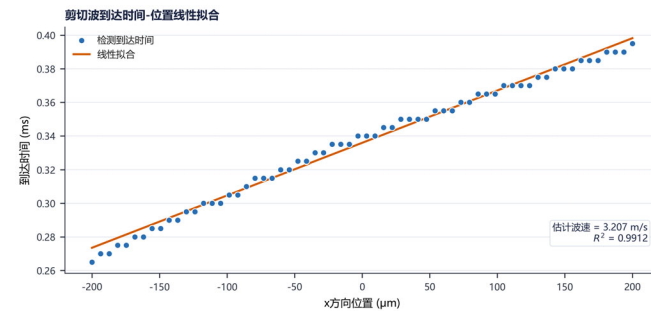


Fig.8 到达时间-位置线性拟合验证波速恒定

线性关系验证均匀介质假设成立, 斜率倒数=剪切波速。

VISCOELASTICITY ALGORITHM

Step 1: 相邻传感器互相关—时延Δt→v_s=Δx/Δt

Step 2: G = ρ·v_s² (弹性项)

Step 3: Maxwell模型频域衰减拟合→η

Maxwell模型: 弹簧(G)+阻尼器(η)串联, 描述组织频率依赖粘弹性响应。

CONCLUSIONS

- 建立PA/SW双模态建模—仿真—重建—定量完整框架
- PA时间反演三维重建 ROI SSIM=0.72
- Maxwell互相关: 波速误差0.76%, G误差5.87%
- 20dB极端噪声下仍可定量 (波速误差≈2.16%)
- 体素场方法实现几何-物理解耦, 框架可扩展

LIMITATIONS

- 四侧线阵有限孔径→z轴分辨率受限
- 均匀背景假设, 未考虑组织异质性
- 当前SW频域信息有限, 限制宽带粘弹性谱估计

FUTURE DIRECTIONS

- 环形/球面阵列 — 各向同性分辨率
- MC光子传输 — 真实光能衰减建模
- 深度学习 — U-Net/Transformer实时重建
- 多网络统计 — VessMAP大规模验证泛化
- 多频SW激励 — 宽带粘弹性色散估计

VOXEL FIELD DEFINITION

vf值	组织	物理属性
>1.5	血管腔	p ₀ =1kPa 初始声压
0.5~1.5	血管壁	体素标签/边界结构
≤0.5	背景组织	E=30kPa, ρ=1080

REFERENCES

[1] Yang et al., J. Biophotonics, 2023. [2] Treeby & Cox, J. Biomed. Opt., 2010. [3] 张兴超等, 2022. [4] 朱亚辉等, 2022.

TECH STACK

COMSOL 6.2 · k-Wave · MATLAB R2024a · VessMAP · Python