

Progresses of photoacoustic-ultrasonic combined imaging reconstruction

SUN Zheng*, SUN Lishuang

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

[Abstract] Ultrasonic computed tomography (USCT) and photoacoustic computed tomography (PACT) are two kinds of complementary imaging techniques. Photoacoustic-ultrasonic (PAUS) imaging combines PACT with USCT into one system and can obtain structural images and optical absorption distribution images of the target simultaneously. The combined images can display the acoustic discontinuity and optical absorption properties of the tissue. The diseased tissue can be accurately identified and located, and the functional components can also be quantitatively measured. The research progresses of the methods of joint images reconstruction for PAUS were reviewed in this paper.

[Keywords] ultrasonography; photoacoustic imaging; image reconstruction

DOI:10.13929/j.1003-3289.201806090

光声-超声联合图像重建方法研究进展

孙 正*, 孙立爽

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

[摘要] 超声层析成像(USCT)和光声层析成像(PACT)是两种互补的成像手段。光声-超声(PAUS)联合成像将 USCT 与 PACT 结合于同一个成像系统,同时获得成像目标的结构图像和光吸收分布图像,反映生物组织声阻抗的不连续性和光吸收特性,能够准确识别病变组织,并分析其功能成分。本文就 PAUS 联合图像重建方法的研究进展进行综述。

[关键词] 超声检查;光声成像;图像重建

[中图分类号] R318; TP301 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2019)03-0467-04

超声层析成像(ultrasonic computed tomography, USCT)利用超声波束扫描成像组织,根据自组织反射回的超声波中提取的声学特征对其形态结构进行成像,具有无辐射、集成度高、成像时间短、组织穿透力强,在可获得的合理穿透深度内有极好的空间对比度等优点,已普遍应用于疾病的临床诊断和治疗。但超声灰度图像分辨率较低,区分组织成分敏感度和特异度有限。光声层析成像(photoacoustic computed tomography, PACT)具有纯光学成像高对比度和超

声检测高空间分辨率的特点;生物组织在短脉冲激光的照射下发生热弹性膨胀并向外辐射超声波(即光声信号),由于不同组织成分的光吸收系数不同,超声换能器可以检测到不同强度的超声波,经图像重建,可得到组织的光吸收分布图。基于不同组织成分光吸收系数和散射系数的差异,PACT 在反映组织结构信息的同时又可灵敏反映其生理特征变化,从而实现功能成像^[1]。

USCT 和 PACT 均以超声波作为载体,且优势互

[基金项目] 国家自然科学基金(61372042)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014ZD31)。

[第一作者] 孙正(1977—),女,河北保定人,博士,教授。研究方向:医学成像和图像处理。

[通信作者] 孙正,华北电力大学电子与通信工程系,071003。E-mail: sunzheng_tju@163.com

[收稿日期] 2018-06-19 **[修回日期]** 2018-12-02

补,超声换能器可以产生超声信号以及接受光声信号和超声回波信号,故 2 个系统可共用同一个超声换能器和信号采集卡,形成光声-超声(photoacoustic-ultrasonic, PAUS)联合成像,充分发挥 2 种成像手段各自的优势,同时获得目标组织的结构和功能信息^[2]。联合图像重建是 PAUS 成像中需要解决的关键问题。本文对 PAUS 联合图像重建方法的研究进展进行综述。

1 PAUS 联合成像原理及发展现状

PAUS 联合成像原理如下:在复合成像探头扫描目标组织的过程中,激光器和超声换能器分时向目标组织发射短脉冲激光和超声波脉冲;激光器在输出激光的同时发出触发信号,集成成像系统通过对超声子系统进行延时,在时域上将超声回波信号和光声信号分开;超声换能器分时采集组织反射、散射或产生的超声信号并传入计算机中,根据信号特性分析组织成分或重建 PAUS 图像。

到目前为止,对 PAUS 联合成像的研究已超过 10 年,大量的体模和动物实验证明了其可行性和识别早期病变组织的能力^[3-4],并已应用于胃肠道^[5]、泌尿系统^[6]、生殖系统^[7]及心脑血管^[8-10]等方面,取得了巨大进展。

2 USCT 和 PACT 图像重建的主要方法

2.1 USCT 图像重建 在 USCT 过程中,超声波穿过非均匀组织时会发生散射,利用散射声波中携带的组织信息可重建组织内的声速分布或声学特性参数。USCT 图像重建方法主要包括 3 种。①射线跟踪法,是基于声波在非均匀介质中折射路径的代数重建方法。假设声波沿直线传播,首先计算其穿越组织的渡越时间,并求出组织折射系数的初始值;然后采用光学中的射线跟踪法校正声波的传播路径,修正折射系数与传播路径之间的关系,获得更精确的折射系数分布。射线跟踪法计算较简单,但只考虑了声波的折射现象,存在较强衍射现象或发生多次折射时此法会受到影响,甚至失效。②衍射层析成像法^[11],系以傅里叶衍射投影定理为基础,在 Born、Rytov 近似下实现层析成像。典型的衍射层析成像法包括频域内的插值算法、空间域内的滤波反投影算法(filtered back projection, FBP)及滤波反向传播算法(filtered-back propagation algorithm, FBPP)等^[12]。此法的计算速度较快,但由于运用了 Born、Rytov 近似,使其仅适用于弱散射组织。③基于精确场描述的层析成像法,其基本思想是采用矩量法将泛函方程转化为矩阵方程并

进行求解,求解方法主要有奇异值分解、截断完全最小二乘以及正则化方法^[13]等。由于在反演目标内部结构时不再利用某种近似假设,因而拓宽了其适用范围,不仅适用于强散射体,亦可应用于弱散射体。该方法最大的不足是矩阵方程不稳定性强,求解过程较繁琐。

2.2 PACT 图像重建 在 PACT 过程中,生物组织在理想短脉冲激光均匀照射下产生的光声信号幅值与入射光的强度成正比,而光声信号的特性由组织的光吸收特性决定,通过合适的算法可从超声探测器采集的声压时间序列中重建出组织的初始声压分布或光吸收分布,从而反映组织形态结构^[14-15]。主要方法有 FBP、时间反演(time reversal, TR)法、相控聚焦法、基于傅里叶变换的重建算法、反卷积重建算法和迭代重建算法等^[16]。

根据光声信号的测量值可以同时重建声速分布和光吸收分布^[17],但恒定声速的假设可导致 PACT 重建图像中存在严重的声学畸变、伪影、模糊以及目标错位等问题,目前多采用基于误差最小化的方法^[18],其主要流程如下:根据 PACT 原理和光声波动方程建立前向成像模型,模拟组织在短脉冲激光照射下产生光声信号的过程,模型的输出即为光声信号的理论值,由光吸收分布和声速分布共同决定;选择适当的优化策略和正则化方法,求解非线性最小二乘问题,使光声信号测量值与理论值之间的误差最小,实现光吸收分布和声速分布的同时重建。主要方法包括基于有限元分析的非线性迭代算法^[19-20]、基于广义 Radon 变换的时域迭代算法^[21]和基于时域波动方程的交替优化算法^[18,22-23]等。与采用恒定声速重建图像相比,利用上述方法重建的光吸收分布图像质量增高,但即使采用完备的光声测量数据集,依然无法准确重建声速分布,故亦无法准确重建光吸收分布,仍需与其他测量数据相结合,以提高重建图像的质量^[23]。

3 PAUS 联合图像重建方法

在 PAUS 联合成像中,可以同时采集组织反射的超声回波数据和组织产生的光声压时间序列,故可同时重建声速分布和光吸收分布,主要方法有独立重建法和联合重建法。

3.1 独立重建法 独立重建法首先根据超声回波测量数据重建声速分布,然后在此基础上由光声信号测量值重建光吸收分布。超声回波信号中包含组织的大量声学信息,超声回波信号亦可用于估算声速分布,主要方法有 2 种^[24],分别为基于射线的方法(即基于几何光学的方法)和基于声波方程的重建算法(即波形反

演法)。前者无法模拟高阶衍射效应,分辨率较低;后者可以产生高分辨率的图像,但计算较复杂。但是,分别独立重建出的声速分布和光吸收分布并非最优。由于光声波根据介质的声学特性传播,光声信号测量值中包含组织的声速分布信息,若仅根据超声回波数据重建声速分布,则忽略了光声信号中隐含的声学信息。因此,与单独采用光声测量数据的方法相比,虽然独立重建法重建的光吸收分布相对准确,但仅根据稀疏的超声回波数据,很难准确估计声速分布。

3.2 联合重建法 联合重建法是同时利用超声回波和光声信号测量值重建声速分布,在此基础上再重建初始声压分布或光吸收分布,可进一步提高重建图像的质量。目前联合重建法主要包含以下 3 种方法:①基于范式转变的方法^[25],该方法定义与声速分布和光吸收分布有关的全变差(total-variation, TV)正则化成本函数,并利用快速迭代收缩阈值算法(fast iterative shrinkage thresholding algorithm, FISTA)使成本函数最小,求解出光吸收分布。重建声速分布时,首先对光声和超声测量数据进行 L2 范数归一化处理,由于加入了源编码的思想,所以采用二阶 K 空间算法重建声速分布。该算法充分利用了光声测量数据中的声学信息,仅用 16 个角度的测量数据便可达到 USCT 中 100 个角度数据的重建效果。②交替优化算法^[26],与基于范式转变的方法中所述的采用交替优化算法重建声速和光吸收分布的方法^[18,22-23]类似,也是通过交替优化与声速分布和光吸收分布有关的成本函数,同时重建声速和光吸收分布,不同之处仅在于其根据 USCT 测量值得到声速分布的初始值。由于充分利用了超声回波和光声测量数据中所包含的声学信息,所以交替优化算法根据光声数据获得的声速分布更精确、稳定性更高。交替优化算法的不足在于:涉及的参数过多,而获取这些参数需要大量实验;每次迭代都要计算子问题,计算过程较复杂;用二维模型代替实际的三维模型,前向模型存在偏差等。③基于逆时偏移(reverse-time migration, RTM)的方法^[27],RTM 是一种常用于勘探地震学的 TR 成像算法^[28],对速度异质性和多方向的复杂传播路径具有很强的处理能力,将其与适当的边界条件相结合,可增强图像 SNR、精确定位结构并减少伪影。基于 RTM 的 PAUS 联合图像重建方法的原理如下:首先,对数值仿真出的激光超声(laser-ultrasound, LU)声场进行 TR 处理,并与检测到的 LU 波一起反向传播,重建 LU 声散射图像;然后,考虑到光声场与 LU 声场不同,光声波直接从声

源传播到组织表面,故仅对测量的光声场进行反向传播,重建初始声压分布图像。该算法应用二维或三维的波动方程,相比于应用单向波动方向的反投影或 TR 算法,其鲁棒性更强,准确率更高;但固有的低频成像噪声以及较高的计算复杂度可能限制其应用。

与独立重建法相比,联合重建法具有以下优点:可以更准确地估计声速分布,进而优化 PACT 重建图像质量;重建图像具有最小的系统伪影;使成像模型中的误差最小化;利用有限角度的超声回波成像数据(即稀疏数据)就可估计出相对准确的声速分布图,实现稀疏数据条件下声速分布的重建^[29]。

4 小结与展望

PAUS 联合图像重建是未来提高 PAUS 成像精度的主要发展方向,但在实际应用中,测量数据的稀疏程度通常较大,采用现有方法重建图像则可能存在较大误差;若能结合压缩感知和深度学习等方法,利用稀疏测量数据准确估计出未测数据,提高数据的完整性,即可提高重建图像的精度,具有高度潜在应用价值。

[参考文献]

- [1] 孙正,苑园,王健健. 血管内光声成像的研究进展. 中国生物医学工程学报, 2015, 34(2): 221-228.
- [2] 孙正,杨凯旋. 生物光声-超声-磁声联合成像的研究进展. 中国医学影像技术, 2017, 33(9): 1407-1411.
- [3] Zhao T, Su L, Xia W. Optical ultrasound generation and detection for intravascular imaging: A review. J Healthc Eng, 2018, 2018: 3182483.
- [4] Lee D, Kim C, Park S. Dual-modal photoacoustic and ultrasound imaging of dental implants//Proceedings of SPIE International Conference on Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2018. San Francisco: SPIE, 2018: 10494.
- [5] Li Y, Lin R, Liu C, et al. In vivo photoacoustic/ultrasonic dual-modality endoscopy with a miniaturized full field-of-view catheter. J Biophotonics, 2018, 11(10): e201800034.
- [6] Sivasubramanian K, Periyasamy V, Dienzo RA, et al. Hand-held, clinical dual mode ultrasound-photoacoustic imaging of rat urinary bladder and its applications. J Biophotonics, 2018, 11(5): e201700317.
- [7] Kim J, Lee D, Jung U, et al. Photoacoustic imaging platforms for multimodal imaging. Ultrasonography, 2015, 34(2): 88-97.
- [8] Wang B, Su JL, Amirian J, et al. Detection of lipid in atherosclerotic vessels using ultrasound-guided spectroscopic intravascular photoacoustic imaging. Opt Express, 2010, 18(5): 4889-4897.
- [9] 孙正,马晓乾. 血管内超声/光声联合成像研究进展. 中国医学影像技术, 2016, 32(6): 979-982.

- [10] Vanderlaan D, Karpouk A, Yeager D, et al. Real-time intravascular ultrasound and photoacoustic imaging. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2017, 64(1):141-149.
- [11] He N, Tao J, Xua S. A new reconstruction approach in diffraction ultrasound tomography: Combine transmission mode with reflection mode tomography. *Procedia Engineering*, 2010, 7(8):51-56.
- [12] 方杰, 韦穗, 霍修坤. 超声衍射层析成像的高精度核卷积插值重建算法. *西安交通大学学报*, 2009, 43(10):94-98.
- [13] Wang K, Li C, Duric N, et al. Image reconstruction for ultrasound computed tomography by use of the regularized dual averaging method//*Proceedings of SPIE International Conference on Medical Image: Ultrasonic Imaging And Tomography 2017*. Florida: SPIE, 2017:10139.
- [14] Sun Z, Han D, Yuan Y. 2-D image reconstruction of photoacoustic endoscopic imaging based on time-reversal. *Comput Biol Med*, 2016, 76:60-68.
- [15] Wang B, Xiong W, Su T, et al. Finite-element reconstruction of 2D circular scanning photoacoustic tomography with detectors far-field condition. *Appl Opt*, 2018, 57(30):9123-9128.
- [16] 孙正, 韩朵朵, 王健健. 血管内光声成像图像重建的研究现状. *光电工程*, 2015, 42(3):20-27.
- [17] Xia J, Huang C, Maslov K, et al. Enhancement of photoacoustic tomography by ultrasonic computed tomography based on optical excitation of elements of a full-ring transducer array. *Opt Lett*, 2013, 38(16):3140-3143.
- [18] Wang B, Su JL, Amirian J, et al. Detection of lipid in atherosclerotic vessels using ultrasound-guided spectroscopic intravascular photoacoustic imaging. *Opt Express*, 2010, 18(5):4889-4897.
- [19] Yuan Z, Zhang Q, Jiang H. Simultaneous reconstruction of acoustic and optical properties of heterogeneous media by quantitative photoacoustic tomography. *Opt Express*, 2006, 14(15):6749-6754.
- [20] Jiang H, Yuan Z, Gu X. Spatially varying optical and acoustic property reconstruction using finite-element-based photoacoustic tomography. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2006, 23(4):878-888.
- [21] Zhang J, Wang K, Yang Y, et al. Simultaneous reconstruction of speed-of-sound and optical absorption properties in photoacoustic tomography via a time-domain iterative algorithm//*Proceedings of SPIE International Conference on Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2008: The Ninth Conference on Biomedical Thermoacoustics, Optoacoustics, and Acousto-optics*. San Jose: SPIE, 2008:68561.
- [22] Huang C. Image reconstruction in photoacoustic computed tomography with acoustically heterogeneous media. St. Louis: Washington University, 2014:55-68.
- [23] Elbau P, Mindrinos L, Scherzer O. Inverse problems of combined photoacoustic and optical coherence tomography. *Math Meth Appl Sci*, 2016, 40(3):505-522.
- [24] Stefanov P, Uhlmann G. Instability of the linearized problem in multiwave tomography of recovery both the source and the speed. *Inverse Probl Imag*, 2017, 7(4):1367-1377.
- [25] Matthews TP, Wang K, Wang LV, et al. Synergistic image reconstruction for hybrid ultrasound and photoacoustic computed tomography//*Proceedings of SPIE International Conference on Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2015*. San Francisco: SPIE, 2015:93233.
- [26] Matthews TP, Anastasio MA. Joint reconstruction of the initial pressure and speed of sound distributions from combined photoacoustic and ultrasound tomography measurements. *Inverse Probl*, 2017, 33(12):124002.
- [27] Johnson JL, Shragge J, Wijk K. Image reconstruction of multi-channel photoacoustic and laser-ultrasound data using reverse time migration//*Proceedings of SPIE International Conference on Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2015*. San Francisco: SPIE, 2015:932314.
- [28] Zhou HW, Hu H, Zou Z, et al. Reverse time migration: A prospect of seismic imaging methodology. *Earth-Sci Rev*, 2018, 179:207-227.
- [29] Cheng RX, Tao C, Liu XJ. Enhancement of photoacoustic tomography in the tissue with speed-of-sound variance using ultrasound computed tomography. *Chin Phys B*, 2015, 24(11):114301.

消 息

《中国医学影像技术》作者投稿请登录本刊网站(www.cjmit.com)主页,点击左上角“作者登录”进入,第一次投稿需完成作者注册;专家审稿请点击“审稿登录”进入。

为了便于广大作者、读者查阅本刊文献,本站提供从 1985 年起的过刊和现刊的全文检索。