



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102727259 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 17

(21) 申请号 201210262846. 3

(22) 申请日 2012. 07. 26

(71) 申请人 中国科学院自动化研究所

地址 100190 北京市海淀区中关村东路 95 号

(72) 发明人 田捷 刘学彦 彭冬 马喜波 杨鑫

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 任岩

(51) Int. Cl.

A61B 8/13(2006. 01)

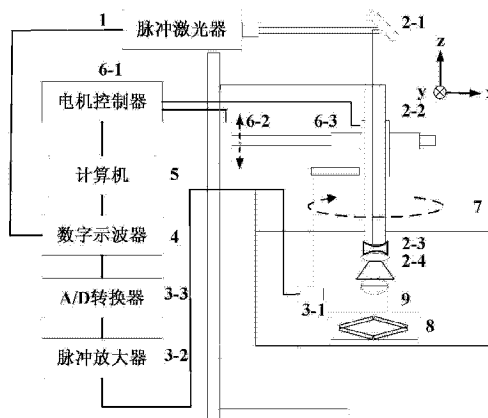
权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于有限角度扫描的光声断层成像装置及方法

(57) 摘要

本发明涉及光声成像技术领域,公开了一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置及方法,采用脉冲激光入射到成像样品产生光声信号,通过单元超声探测器在圆弧上有限位置采集光声信号,经信号放大器放大后,输入 A/D 转换器将声信号转化为电信号,最后传输到示波器完成数字信号采集;将成像样品光声信号输入计算机,计算机将光声信号进行滤波和傅里叶变换处理,根据实验条件提取光声信号频域信息,构建前向投影算子和测量矩阵,计算机基于快速稀疏算法对信号重建成像。本发明具有信号采集时间短,重建速度快,操作方便,适应性和扩展性好等优点。



1. 一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,该光声断层成像装置包括:脉冲激光器(1);由反射镜(2-1)、镜筒(2-2)、凹面镜(2-3)和毛玻璃(2-4)构成的光路处理装置(2);由超声探测器(3-1)、超声放大器(3-2)和A/D转换器(3-3)构成的信号采集装置(3);数字示波器(4);计算机(5);由电机控制器(6-1)、平移台(6-2)和旋转台(6-3)构成的三维平移旋转台(6);样品池(7);样品支架(8);以及成像样品(9);

其中,脉冲激光器(1)、光路处理装置(2)、信号采集装置(3)、数字示波器(4)、计算机(5)和三维平移旋转台(6)依次连接,超声探测器(3-1)采集到的光声信号经过放大后,传输到A/D转换器(3-3)的输入端,最后传输到数字示波器(4),数字示波器(4)与脉冲激光器(1)电气相连,用于控制信号的激发和采集;数字示波器(4)将数字信号传输到计算机(5),计算机(5)用于所述电机控制器(6-1)和数字示波器(4)信号采集的同步控制,并对每个探测位置采集信号频谱分析,存储光声信号的部分频率信息,通过对圆弧上有限角度位置信号采集,构建前向投影算子,基于快速稀疏算法对信号重建,获得成像物体的光声断层成像。

2. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述超声探测器(3-1)通过架杆连接于旋转台(6-3),旋转台(6-3)和超声探测器(3-1)作为整体通过支架连接于平移台(6-2),电机控制器(6-1)控制旋转台(6-3)的旋转角度和平移台(6-2)的位移,并控制超声探测器(3-1)的旋转和平移。

3. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述计算机(5)通过USB接口分别连接数字示波器(4)和电机控制器(6-1),用于控制信号采集和超声探测器(3-1)的位置旋转。

4. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述脉冲激光器(1)选用倍频的Q-Switched Nd:YAG脉冲激光器,波长为532nm-1064nm,脉冲宽度为6.5ns,重复频率10Hz,脉冲激光器(1)发出的脉冲激光入射到成像物体产生声信号。

5. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述光路处理装置(2)中,反光镜(2-1)和镜筒(2-2)分别固定于同一支架上,反光镜(2-1)和脉冲激光之间夹角为45度;凹透镜(2-3)和毛玻璃(2-4)通过半封闭圆环固定在镜筒(2-2)上,通过调节镜筒的高度来控制照射到成像物体光斑的大小,满足脉冲激光照射样品需求的同时保证超声探测器(3-1)实现任意角度无障碍扫描。

6. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述信号采集装置(3)中,超声探测器(3-1)为单阵元超声探测器(3-1),超声探测器(3-1)通过支架连接到旋转台(6-3),所述探测器(3-1)在成像物体水平切面内垂直旋转成像样品(9),在圆弧上有限位置采集成像样品(9)光声信号。

7. 根据权利要求6所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述信号采集装置(3)灵敏度为950mv/Pa,频率带宽为200KHz-15MHz,探针的直径为1mm。

8. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述数字示波器(4)选用混合信号示波器,具有350MHz的带宽,最高可达2.5GS/s的取样速率,在所有通道上实现20M样点的记录长度。

9. 根据权利要求1所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,

所述三维平移旋转台 (6) 中,电机控制器 (6-1) 控制平移台 (6-2) 和旋转台 (6-3) 的旋转,能完成对成像物体的竖直扫描和弧形扫描。

10. 根据权利要求 9 所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置,其特征在于,所述平移台 (6-2) ETSP200 最大行程为 200mm,重复定位精度 $3\mu\text{m}$;所述旋转台 (6-3) ERSP100 重复定位精度为 0.005 度,分辨率为 0.00125 度。

11. 一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,应用于权利要求 1 至 10 中任一项所述的快速光声断层成像装置,其特征在于,该方法通过对圆弧上不同位置采集的光声信号进行滤波处理再作傅里叶变换,通过频谱分析,随机提取信号主要频率所对应的频窗中的频率成分,具体包括:

步骤 S1:根据超声探测器的脉冲响应和重建图像的离散网格,建立有限角度位置的光声信号对应的前向投影算子 K ;

步骤 S2:将重建图像向量化为 x ,采用小波矩阵 Φ 稀疏表示,图像重建变换为求解图像的小波基空间系数 θ ;

步骤 S3:组建观测矩阵 $A = K\Phi$,选取基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$;

步骤 S4:采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x 。

12. 根据权利要求 11 所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,其特征在于,步骤 S1 中所述前向投影算子 K 仅与探测器类型和重建图像的精度有关,不受采集信号的影响。

13. 根据权利要求 11 所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,其特征在于,步骤 S2 中所述变换充分考虑了图像在小波域的稀疏性。

14. 根据权利要求 11 所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,其特征在于,步骤 S3 中所述采用基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$ 的过程为:

步骤 S31:根据采集信号的统计性质设置正则化参数,并根据噪声水平确定迭代终止条件,设置初始解为零向量;

步骤 S32:将图像 x 的全变分 $Dx \in R^2$ 降低维数处理,用任意的向量 $w \in R^2$ 逼近,基于 L1-L2 范数的 TV 正则化模型可转化为性能更优的新模型:

$$\min \sum \phi_2(w, Dx) + \alpha \sum \phi_1(z, \theta) + \lambda F(x, f)$$

步骤 S33:根据第 $i-1$ ($i = 2, 3, \dots$) 步优化图像 x_{i-1} ,计算向量 w_i 和稀疏系数向量 θ_i ,采用交替优化算法计算图像 x_i ;

步骤 S34:根据步骤 S31 中的迭代终止条件,判断当前图像是否达到终止要求,如果没有则返回步骤 S33 继续迭代。

15. 根据权利要求 11 所述的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,其特征在于,步骤 S4 中所述采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x ,具体包括:

步骤 S41:根据步骤 S3 的迭代条件,判断整个求解过程是否达到终止迭代条件,满足则输出小波域稀疏解 $\bar{\theta}$;

步骤 S42 :对步骤 S2 中所采用小波投影矩阵 Φ , 求逆变换 Φ^{-1} ;

步骤 S43 :根据步骤 S41 所得小波域稀疏解 $\bar{\theta}$ 和步骤 S42 所得逆变换 Φ^{-1} , 求取原始样品的重建图像 x 。

基于有限角度扫描的光声断层成像装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种光声断层成像 (Photoacoustic Tomography, 简称 PAT) 技术, 尤其涉及一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置及方法。

背景技术

[0002] 光声成像技术是新发展起来的一种非侵入式和非电离式的医学成像技术, 近年来获得迅速发展, 并成为当今国际研究的前沿热点课题。光声信号的产生是复合媒介间能量转换的过程, 它结合了纯光学成像具有的无损伤性、高选择激发特性和纯超声成像具有的低衰减、高穿透特性, 能够在一定的深度下获得高的图像分辨率和对比度, 图像传递的信息量大, 可以提供形态及功能信息。光声成像技术目前已在生物组织成像中得到广泛应用, 如肿瘤检测、血管成像、脑功能成像等相关研究。

[0003] 基于光声效应, 短脉冲激光入射到成像样品, 局部组织吸收光能产生热膨胀向四周辐射超声波, 通过超声换能器在不同位置扫描并采集光声信号, 不同位置的吸收体经过算法能被重建出来。在光声成像中, 装置的成本主要取决于设备的复杂程度, 而成像质量和成像速度则取决于重建算法。现有单元探测器光声成像主要采用圆周多点采集信号的方式, 装置扫描时间长, 相应的重建算法有反卷积、相控聚焦、逆 Radon 变换、迭代重建算法等, 但准确重建需要的数据量大且算法复杂度高, 因此简化信号采集和高效重建算法是应用光声成像的关键。

发明内容

[0004] (一) 要解决的技术问题

[0005] 本发明目的在于克服现有技术的缺点, 提供一种低成本、操作简单、快速扫描和精确成像的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置及方法, 以基于有限角度扫描的欠采样数据和快速稀疏算法准确重建原始图像。

[0006] (二) 技术方案

[0007] 为达到上述目的, 本发明提供了如下技术方案:

[0008] 一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置, 该光声断层成像装置包括: 脉冲激光器 1; 由反射镜 2-1、镜筒 2-2、凹面镜 2-3 和毛玻璃 2-4 构成的光路处理装置 2; 由超声探测器 3-1、超声放大器 3-2 和 A/D 转换器 3-3 构成的信号采集装置 3; 数字示波器 4; 计算机 5; 由电机控制器 6-1、平移台 6-2 和旋转台 6-3 构成的三维平移旋转台 6; 样品池 7; 样品支架 8; 以及成像样品 9; 其中, 脉冲激光器 1、光路处理装置 2、信号采集装置 3、数字示波器 4、计算机 5 和三维平移旋转台 6 依次连接, 超声探测器 3-1 采集到的光声信号经过脉冲放大后, 传输到 A/D 转换器 3-3 的输入端, 最后传输到数字示波器 4, 数字示波器 4 与脉冲激光器 1 电气相连, 用于控制信号的激发和采集; 数字示波器 4 将处理信号传输到计算机 5, 计算机 5 用于所述电机控制器 6-1 和数字示波器 4 信号采集的同步控制, 并对每个探测位置采集信号频谱分析, 存储光声信号的部分频率信息, 通过对圆弧上有限角度位置信号

采集,构建前向投影算子,基于快速稀疏算法对信号重建,获得成像物体的光声断层成像。

[0009] 上述方案中,所述超声探测器 3-1 通过架杆连接于旋转台 6-3,旋转台 6-3 和超声探测器 3-1 作为整体通过支架连接于平移台 6-2,电机控制器 6-1 控制旋转台 6-3 的旋转角度和平移台 6-2 的位移,并控制超声探测器 3-1 的旋转和平移。

[0010] 上述方案中,所述计算机 5 通过 USB 接口分别连接数字示波器 4 和电机控制器 6-1,用于控制信号采集和超声探测器 3-1 的位置旋转。

[0011] 上述方案中,所述脉冲激光器 1 选用倍频的 Q-Switched Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 532nm-1064nm,脉冲宽度为 6.5ns,重复频率 10Hz,脉冲激光器 1 发出的脉冲激光入射到成像物体产生声信号。

[0012] 上述方案中,所述光路处理装置 2 中,反光镜 2-1 和镜筒 2-2 分别固定于同一支架上,反光镜 2-1 和脉冲激光之间夹角为 45 度;凹透镜 2-3 和毛玻璃 2-4 通过半封闭圆环固定在镜筒 2-2 上,通过调节镜筒的高度来控制照射到成像物体光斑的大小,满足脉冲激光照射样品需求的同时保证超声探测器 3-1 实现任意角度无障碍扫描。

[0013] 上述方案中,所述信号采集装置 3 中,超声探测器 3-1 为单阵元超声探测器 3-1,超声探测器 3-1 通过支架连接到旋转台 6-3,所述探测器 3-1 在成像物体水平切面内垂直旋转成像样品 9,在圆弧上有限位置采集成像样品 9 光声信号。所述信号采集装置 3 灵敏度为 950mv/Pa,频率带宽为 200KHz-15MHz,探针的直径为 1mm。

[0014] 上述方案中,所述数字示波器 4 选用混合信号示波器,具有 350MHz 的带宽,最高可达 2.5GS/s 的取样速率,在所有通道上实现 20M 样点的记录长度。

[0015] 上述方案中,所述三维平移旋转台 6 中,电机控制器 6-1 控制平移台 6-2 和旋转台 6-3 的旋转,能完成对成像物体的竖直扫描和弧形扫描。所述平移台 6-2ETSP200 最大行程为 200mm,重复定位精度 3 μ m;所述旋转台 6-3ERSP100 重复定位精度为 0.005 度,分辨率为 0.00125 度。

[0016] 一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法,应用于所述的快速光声断层成像装置,该方法通过对圆弧上不同位置采集的光声信号进行滤波处理再作傅里叶变换,通过频谱分析,随机提取信号主要频率所对应的频窗中的频率成分,具体包括:

[0017] 步骤 S1:根据超声探测器的脉冲响应和重建图像的离散网格,建立有限角度位置的光声信号对应的前向投影算子 K ;

[0018] 步骤 S2:将重建图像向量化为 x ,采用小波矩阵 Φ 稀疏表示,图像重建变换为求解图像的小波基空间系数 θ ;

[0019] 步骤 S3:组建观测矩阵 $A = K\Phi$,选取基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$;

[0020] 步骤 S4:采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x 。

[0021] 上述方案中,步骤 S1 中所述前向投影算子 K 仅与探测器类型和重建图像的精度有关,不受采集信号的影响。

[0022] 上述方案中,步骤 S2 中所述变换充分考虑了图像在小波域的稀疏性。

[0023] 上述方案中,步骤 S3 中所述采用基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$ 的过程为:

[0024] 步骤 S31 :根据采集信号的统计性质设置正则化参数,并根据噪声水平确定迭代终止条件,设置初始解为零向量;

[0025] 步骤 S32 :将图像 x 的全变分 $Dx \in R^2$ 降低维数处理,用任意的向量 $w \in R^2$ 逼近,基于 L1-L2 范数的 TV 正则化模型可转化为性能更优的新模型:

[0026] $\min \sum \phi_2(w, Dx) + \alpha \sum \phi_1(z, \theta) + \lambda F(x, f);$

[0027] 步骤 S33 :根据第 $i-1$ ($i = 2, 3, \dots$) 步优化图像 x_{i-1} , 计算向量 w_i 和稀疏系数向量 θ_i , 采用交替优化算法计算图像 x_i ;

[0028] 步骤 S34 :根据步骤 S31 中的迭代终止条件,判断当前图像是否达到终止要求,如果没有则返回步骤 S33 继续迭代。

[0029] 上述方案中,步骤 S4 中所述采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x , 具体包括:

[0030] 步骤 S41 :根据步骤 S3 的迭代条件,判断整个求解过程是否达到终止迭代条件,满足则输出小波域稀疏解 $\bar{\theta}$;

[0031] 步骤 S42 :对步骤 S2 中所采用小波投影矩阵 Φ , 求逆变换 Φ^{-1} ;

[0032] 步骤 S43 :根据步骤 S41 所得小波域稀疏解 $\bar{\theta}$ 和步骤 S42 所得逆变换 Φ^{-1} , 求取原始样品的重建图像 x 。

[0033] (三) 有益效果

[0034] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0035] 1、本发明提供的快速光声断层成像装置及方法,采用装置模块化结构设计,可靠性好,硬件成本低;信号采集和图像重建完全由计算机控制,操作简单,使用方便。

[0036] 2、本发明提供的快速光声断层成像装置及方法,采用单阵元探测器在有限角度位置采集光声信号,采样时间短。

[0037] 3、本发明提供的快速光声断层成像装置及方法,采用去噪声技术和傅里叶变换技术,有效去除光声信号中的高斯噪声,显著提高光声信号信噪比。

[0038] 4、本发明提供的快速光声断层成像装置及方法,采用 TVL1-L2 快速稀疏重建算法,在小数据量光声信号中获得很好的成像质量,保证了成像的分辨率的同时提高了重建速度。

[0039] 5、本发明提供的快速光声断层成像装置及方法,采用的三维旋转平移台,能完成样品的柱状扫描和三维平移扫描,能对不同形状的样品断层成像,适应性好。

附图说明

[0040] 图 1 是依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置的结构示意图;

[0041] 图 2 是依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法的流程图;

[0042] 图 3 是依照本发明实施例的基于 TVL1-L2 全变分快速稀疏重建算法的流程图;

[0043] 图 4 是依照本发明实施例的快速稀疏重建算法重建仿真实验结果的示意图;

[0044] 图 5 是依照本发明实施例的基于本发明装置采集的光声信号图像重建样品图像。

具体实施方式

[0045] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照附图,对本发明进一步详细说明。

[0046] 如图 1 所示,图 1 是依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置的结构示意图,该光声断层成像装置包括:脉冲激光器 1,由反射镜 2-1、镜筒 2-2、凹面镜 2-3 和毛玻璃 2-4 构成的光路处理装置 2,由超声探测器 3-1、超声放大器 3-2 和 A/D 转换器 3-3 构成的信号采集装置 3,数字示波器 4,计算机 5,由电机控制器 6-1、平移台 6-2 和旋转台 6-3 构成的三维平移旋转台 6,样品池 7,样品支架 8 和成像样品 9。

[0047] 其中,脉冲激光器 1、光路处理装置 2、信号采集装置 3、数字示波器 4、计算机 5 和三维平移旋转台 6 依次连接,超声探测器 3-1 采集到的光声信号经过脉冲放大后,传输到 A/D 转换器 3-3 的输入端,最后传输到数字示波器 4,数字示波器 4 与脉冲激光器 1 电气相连,用于控制信号的激发和采集;数字示波器 4 将数字信号传输到计算机 5,计算机 5 用于所述电机控制器 6-1 和数字示波器 4 信号采集的同步控制,并对每个探测位置采集信号频谱分析,存储光声信号的部分频率信息,通过对圆弧上有限角度位置信号采集,构建前向投影算子,基于快速稀疏算法对信号重建,获得成像物体的光声断层成像。

[0048] 所述超声探测器 3-1 通过架杆连接于旋转台 6-3,旋转台 6-3 和超声探测器 3-1 作为整体通过支架连接于平移台 6-2,电机控制器 6-1 控制旋转台 6-3 的旋转角度和平移台 6-2 的位移,并控制超声探测器 3-1 的旋转和平移。所述计算机 5 通过 USB 接口分别连接于数字示波器 4 和电机控制器 6-1,用于控制信号采集和超声探测器 3-1 的位置旋转。

[0049] 本发明的光声断层成像装置构成组件选择如下:脉冲激光器 1 选用倍频的 Q-Switched Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 532nm,脉冲宽度为 6.5ns,重复频率 10Hz。光路处理装置 2 中,反光镜 2-1 和镜筒 2-2 分别固定于同一支架上,反光镜 2-1 和脉冲激光之间夹角为 45 度;凹透镜 2-3 和毛玻璃 2-4 通过半封闭圆环固定在镜筒 2-2 上,满足脉冲激光照射样品需求的同时保证超声探测器 3-1 无障碍扫描。超声信号测量组件 3 为英国 Precision Acoustics 公司生产的 HP1 型,其灵敏度为 950mv/Pa,频率带宽为 200KHz-15MHz,探针的直径为 1mm;超声探测器 3-1 为单阵元超声探测器 3-1。数字示波器 4 选用泰克公司的 MS04034 混合信号示波器,350MHz 的带宽,最高可达 2.5GS/s 的取样速率,在所有通道上实现 20M 样点的记录长度;三维平移旋转台 6 中,电机控制器 6-1 控制平移台 6-2 和旋转台 6-3,平移台 6-2 ETSP200 最大行程为 200mm,重复定位精度 3 μ m,旋转台 6-3 ERSP100 重复定位精度为 0.005 度,分辨率为 0.00125 度。计算机 5 采用普通 PC 机,内存 1G 以上,人机交互界面通过 Visual C++ 语言实现。样品池 7 为有机玻璃加工的方形盒子。

[0050] 图 1 所示的快速光声断层成像装置,其工作流程是:步骤 1:脉冲激光器、反射镜、凹透镜、毛玻璃和镜筒构成光声信号的触发模块。脉冲激光经光路处理装置反射、扩束、均匀后照射到样品上号产生光声信号,实验中我们采用的 532nm 的激光;步骤 2:单阵元超声探测器、A/D 转换器、超声放大器、示波器依次电气相连构成信号采集模块。样品辐射光声信号经单阵元超声探测器采集后传入超声放大器放大,然后传输到 A/D 转换器完成声信号到电信号的转换,电信号经示波器转换后将数字信号经 USB 电路传输到电脑储存,完成一个角度位置的一次光声信号的采集;步骤 3:计算机控制所述信号触发模块和信号采集模块,完成一个位置信号采集存储后,控制三维平移旋转台旋转到下一个位置,所述示波器触

发脉冲激光器发射脉冲激光,开始下一次信号采集,超声探测器重新开始采集信号。

[0051] 基于上述快速光声断层成像装置,图 2 是依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法的流程图,该方法通过对圆弧上不同位置采集的光声信号进行滤波处理再作傅里叶变换,通过频谱分析,随机提取信号主要频率所对应的频窗中的频率成分,具体包括:

[0052] 步骤 S1:根据超声探测器的脉冲响应和重建图像的离散网格,建立有限角度位置的光声信号对应的前向投影算子 K ;所述前向投影算子 K 仅与探测器类型和重建图像的精度有关,不受采集信号的影响。

[0053] 步骤 S2:将重建图像向量化为 x ,采用小波矩阵 Φ 稀疏表示,图像重建变换为求解图像的小波基空间系数 θ ;所述变换充分考虑了图像在小波域的稀疏性。

[0054] 步骤 S3:组建观测矩阵 $A = K\Phi$,选取基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$;

[0055] 步骤 S4:采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x 。

[0056] 其中,步骤 S3 中所述采用基于欠采样的 TVL1-L2 范数的快速稀疏算法,求解稀疏系数的最优解 $\bar{\theta}$ 的过程为:

[0057] 步骤 S31:根据采集信号的统计性质设置正则化参数,并根据噪声水平确定迭代终止条件,设置初始解为零向量;

[0058] 步骤 S32:将图像 x 的全变分 $Dx \in R^2$ 降低维数处理,用任意的向量 $w \in R^2$ 逼近,基于 L1-L2 范数的 TV 正则化模型可转化为性能更优的新模型:

[0059]
$$\min \sum \phi_2(w, Dx) + \alpha \sum \phi_1(z, \theta) + \lambda F(x, f);$$

[0060] 步骤 S33:根据第 $i-1$ ($i = 2, 3, \dots$) 步优化图像 x_{i-1} ,计算向量 w_i 和稀疏系数向量 θ_i ,采用交替优化算法计算图像 x_i ;

[0061] 步骤 S34:根据步骤 S31 中的迭代终止条件,判断当前图像是否达到终止要求,如果没有则返回步骤 S33 继续迭代。

[0062] 步骤 S4 中所述采用小波反变换算法,将所述重建稀疏系数 $\bar{\theta}$ 转换为原始样品的重建图像向量 x ,具体包括:

[0063] 步骤 S41:根据步骤 S3 的迭代条件,判断整个求解过程是否达到终止迭代条件,满足则输出小波域稀疏解 $\bar{\theta}$;

[0064] 步骤 S42:对步骤 S2 中所采用小波投影矩阵 Φ ,求逆变换 Φ^{-1} ;

[0065] 步骤 S43:根据步骤 S41 所得小波域稀疏解 $\bar{\theta}$ 和步骤 S42 所得逆变换 Φ^{-1} ,求取原始样品的重建图像 x 。

[0066] 基于图 2 所示的依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像方法的流程图,图 3 至图 5 示出了依照本发明实施例的基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置的工作流程图,具体包括以下步骤:

[0067] 步骤 S1:将样品 9 放到样品池 7 中,校正超声探测器 3-1 的位置,使其在样品的水平切面内垂直旋转中心旋转;将待测样品 9 放在样品池 7,532nm 的脉冲激光经光路处理装置后照射到样品上号产生光声信号;

[0068] 步骤 S2:采用中心频率为 5MHz 的单阵元超声探测器 3-1,放置在样品的后方,采集

样品 9 辐射光声信号后经超声放大器和 A/D 转换器完成声电信号的转换, 电信号传输到示波器, 所采集信号经 USB 电路传输到电脑储存, 超声探测器 3-1 在每个位置采集 100 次后, 完成一个角度光声信号的采集;

[0069] 步骤 S3: 计算机 5 完成信号存储后, 控制三维平移旋转台 6 旋转到下一个位置, 超声探测器 3-1 开始重新开始采集信号, 电机控制器 6-1 控制旋转台 6-3 带动超声探测器 3-1 在 x-y 平面内旋转, 旋转间隔为 5 度, 采样位置为 50 个, 电机控制器 6-1 控制平移台 6-2 在 Z 轴方向上下移动, 完成对成像物体的三维圆柱形扫描, 上下移动间隔为 0.1mm;

[0070] 步骤 S4: 计算机 5 采集全部光声信号后, 先通过 matlab 软件对信号滤波处理, 然后进行傅里叶变换, 通过频谱分析求出光声信号频域的主要成分, 根据探测器 3-1 的探测信号的空间范围和脉冲响应, 构造频域前向投影算子, 根据重建图像的大小, 选择合适的小波矩阵, 合成观测矩阵, 通过奇异值分解做出观测矩阵的正交基矩阵, 基于快速稀疏重建算法进行样品图像重建。

[0071] 下面做具体描述:

[0072] 根据光声效应和超声的运动方程和扩散方程, 可以得到光声的基本方程:

$$[0073] \quad (\nabla^2 + \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) p(r, t) = -\frac{\beta}{C_p} A(r) \frac{\partial I(t)}{\partial t} \quad (1)$$

[0074] 其中 ∇ 表示哈密尔顿算子, $p(r, t)$ 是位置 r 处时刻 t 的光声信号, $A(r)$ 是样品能量吸收分布函数, $I(t)$ 是脉冲激光的能量函数, v_s 是样品中的声速, C_p 是样品的比热容, β 是等压膨胀系数, 光声重建是典型的逆问题, 即如何由 $p(r, t)$ 求出 $A(r)$ 。

[0075] 通过使用格林函数求解方程 1, 得到

$$[0076] \quad p(r, t) = \frac{\beta}{4\pi C_p} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{A(r')}{t} \frac{1}{|r-r'|} d^2r' \quad (2)$$

[0077] 式 2 表示了光声信号和样品光吸收系数的关系, 对采集到光声信号 $p(r, t)$ 进行傅里叶变换, 式 2 的频域表示为:

$$[0078] \quad \bar{p}(r, t) = -ickg(k) \int A(r') \frac{e^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} dr' \quad (3)$$

[0079] 其中 $k = \omega/c$ 表示频率, $g(k)$ 表示探测器的脉冲响应, 将图像和采集信号离散化, 进一步可描述为:

$$[0080] \quad y = Kx + e \quad (4)$$

[0081] y 是采集光声信号的傅里叶变换, 信号长度为 $N = n \times l$, n 为探测位置个数, l 为每个位置信号的长度, x 为吸收系数的向量表示, 其长度为 $M = m^2$, m 为重建图像的尺寸, K 为频域的观测矩阵, 其大小为 $N \times M$, e 为随机噪声。

[0082] 设 x 在基 Φ 下是稀疏的, 记为 $x = \Phi \theta$, 其中 $\|\theta\|_0$ 表示稀疏度。则有:

$$[0083] \quad y = K\Phi \theta + e \quad (5)$$

[0084] 式 5 可简记为 $y = A \theta + e$ 由观测值 y 根据式 5 求得最优解为 $\bar{\theta}$, 则可在基 Φ 取反变换, 求得最优解 \bar{x} 。

[0085] 首先给定正则化初始化参数 α, β, λ , 最大迭代次数和迭代误差终止条件 ε 。整个迭代过程如图 3 所示, 图 3 是依照本发明实施例的基于 TVL1-L2 全变分快速稀疏重建算法的流程图。

[0086] 我们采用 TVL1-L2 快速稀疏算法求解 $\bar{\theta}$, 可以满足图像重建的精度, 得到模型如下:

[0087]

$$\min \sum \|D\theta\|_2 + \alpha \sum \|\varphi^T \theta\|_1 + \frac{\lambda}{2} \|A\theta - y\|_2^2 \quad (6)$$

[0088] 为加快重建速度, 减小算法复杂度, 我们采用交替循环算法更新 θ , 这里引入新的变量 $\phi_1(z_i, \varphi^T \theta) = \|z_i\|_1 + \frac{\beta}{2} \|z_i - \varphi^T \theta\|_1^2$; z_i 为任意实数; $\phi_2(w_i, D_i \theta) = \|w_i\|_1 + \frac{\beta}{2} \|w_i - D_i \theta\|_1^2$, $w_i = (w_i^{(1)}, w_i^{(2)})$ 为二维空间任意向量, 用来逼近 $D_i \theta \in \mathbb{R}^2$ ($D_i = (D_i^{(1)}, D_i^{(2)})^T$ 为 x_i 在行方向和列方向的局部差分); 上述式 6 可用新的模型代替

[0089]

$$\min \sum \phi_2(w_i, D_i \theta) + \alpha \sum \phi_1(z_i, \varphi_i^T \theta) + \frac{\lambda}{2\beta} \|A\theta - y\|_2^2 \quad (7)$$

[0090]

对于第 k 步迭代 θ_k , 采用一维收缩法 $z_i^k = \max\{|\varphi_i^T \theta| - \frac{1}{\beta}, 0\} \cdot \text{sgn}(\varphi_i^T \theta)$ 最小化 $\phi_1(z_i, \varphi_i^T \theta)$; 采用二维收缩法 $w_i^k = \max\{|D_i \theta| - \frac{1}{\beta}, 0\} \cdot \text{sgn}(D_i \theta)$ 最小化 $\phi_2(w_i, D_i \theta)$;

更新 $w^k = \{w_1^k, w_2^k, \dots, w_M^k\}$, $z^k = \{z_1^k, z_2^k, \dots, z_M^k\}$, 利用更新后的 w^k 和 z^k , 通过解决下述最小二乘问题更新稀疏系数 θ_{k+1} 。

[0091]

$$\min_{\theta} \sum (\phi_2(w_i^k - D_i \theta) + \alpha \phi_1(z_i^k - \varphi_i^T \theta)) + \frac{\lambda}{2\beta} \|A\theta - y\|_2^2 \quad (8)$$

[0092] 为简化计算, 我们记 $D^{(1)} = [D_1^{(1)}, D_2^{(1)}, \dots, D_M^{(1)}]^T$, $D^{(2)} = [D_1^{(2)}, D_2^{(2)}, \dots, D_M^{(2)}]^T$ 分别表示行方向和列方向的全变分, 相应的二维变量为 $w^{(1)} = [w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_M^{(1)}]$, $w^{(2)} = [w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, \dots, w_M^{(2)}]$, 那么 $\sum (\phi_2(w_i^k - D_i \theta) + \alpha \phi_1(z_i^k - \varphi_i^T \theta)) = \|w^{(1)} - D^{(1)} \theta\|_1^2 + \|w^{(2)} - D^{(2)} \theta\|_1^2$ 。上述式 8 可用如下方程求解:

$$L\theta = \bar{y} \quad (9)$$

[0094] 其中 $L = (D^{(1)})^T D^{(1)} + (D^{(2)})^T D^{(2)} + \alpha I + \lambda / \beta F^T F$, $\bar{y} = (D^{(1)})^T w_1 + (D^{(2)})^T w_2 + \alpha \Phi z + \lambda / \beta F^T F y$, 根据稀疏变量 θ 的性质, $D^{(1)}$ 和 $D^{(2)}$ 为循环矩阵可用傅里叶变换矩阵 F 对角化, 即为 $\bar{D}^{(1)} = F D^{(1)} F^T$, 因为基 Φ 是正交的, 可在式 9 左右同时乘以 F , 加速求解过程。通过求解全变分误差 $\phi_2(w^k - D \theta)$ 和小波误差 $\phi_1(z^k - \Phi^T \theta)$ 和模型误差 $r = DT(D\theta - w) + \alpha(\theta - \Phi z) + \lambda / \beta \nabla \|A\theta - y\|_2^2$, 取 $\text{res} = \max\{\phi_1, \phi_2, r\}$, 若满足 $\text{res} < \varepsilon$ 则终止迭代。

[0095] 图 4 是依照本发明实施例的快速稀疏重建算法重建仿真实验结果的示意图, 本发明采用快速算法的仿真验证, 通过重建图像和原始图像的重建误差可看出该算法能很好的重建原始图像。

[0096] 图 5 是依照本发明实施例的基于本发明装置采集的光声信号图像重建样品图像, 其中左图是本发明样品的示意图, 右图是基于采用本发明的装置采集信号和快速稀疏重建算法的重建图像, 可以看出重建图像能很好的反映原样品的结构细节, 图像的分辨率也很

高。

[0097] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

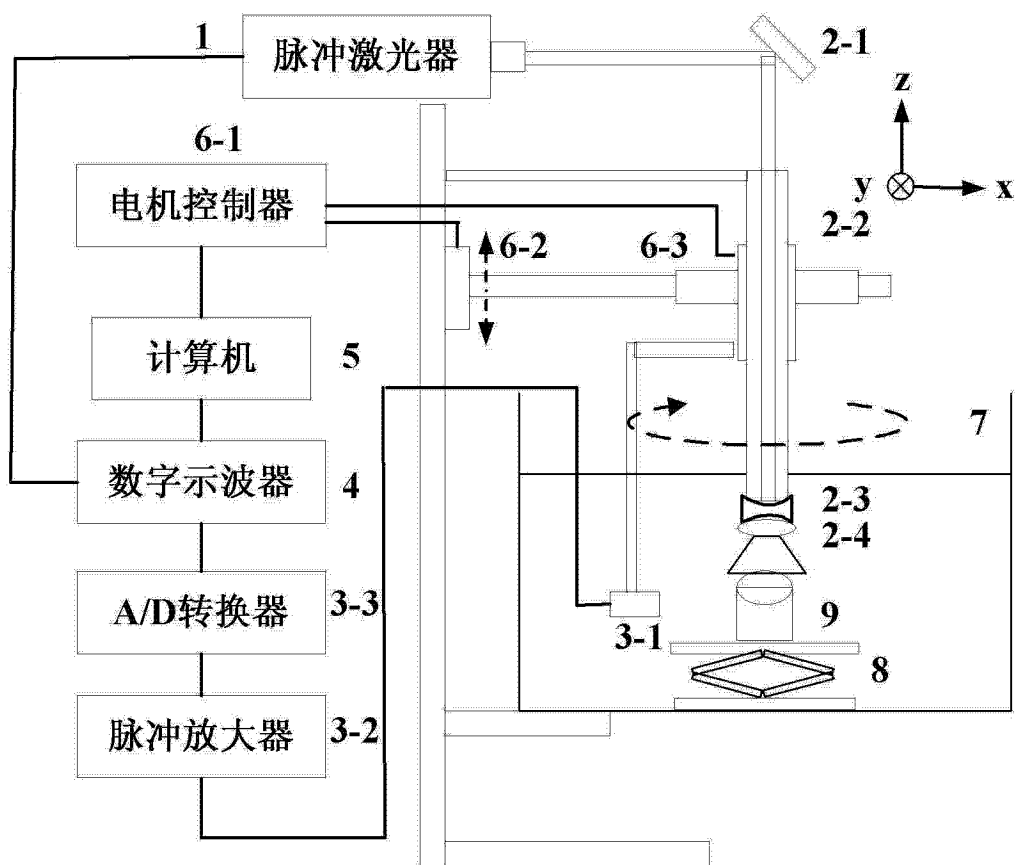


图 1

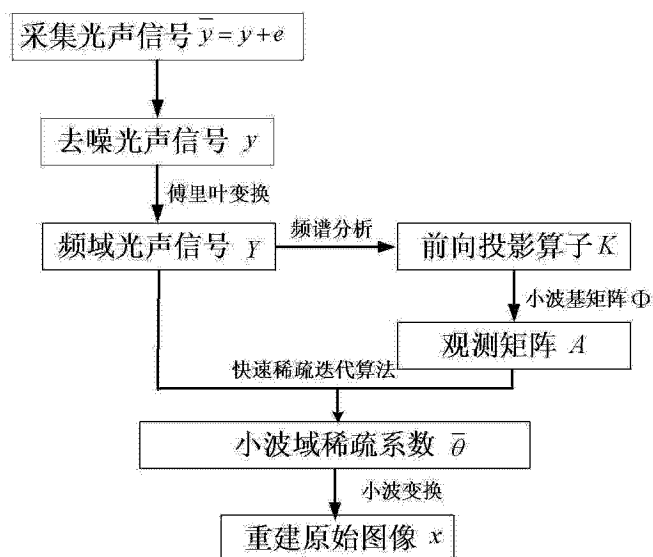


图 2

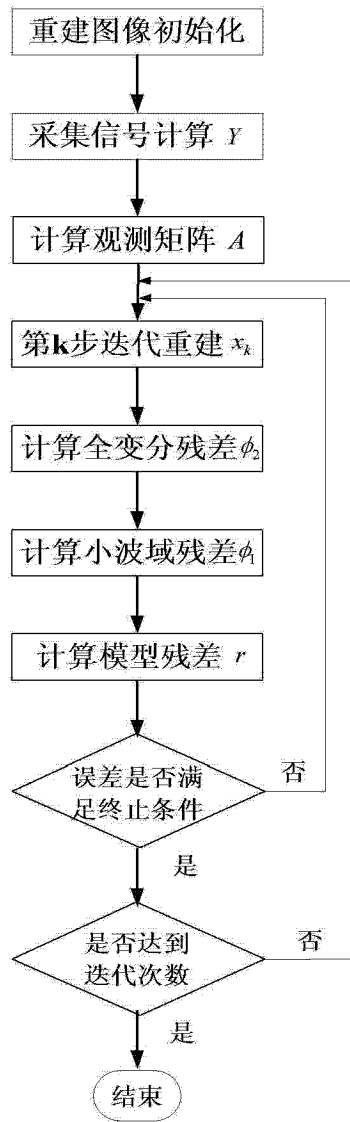


图 3

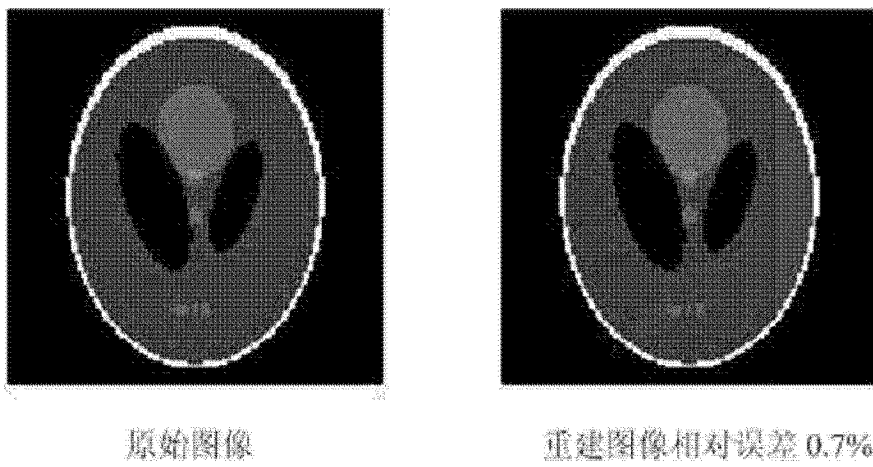


图 4

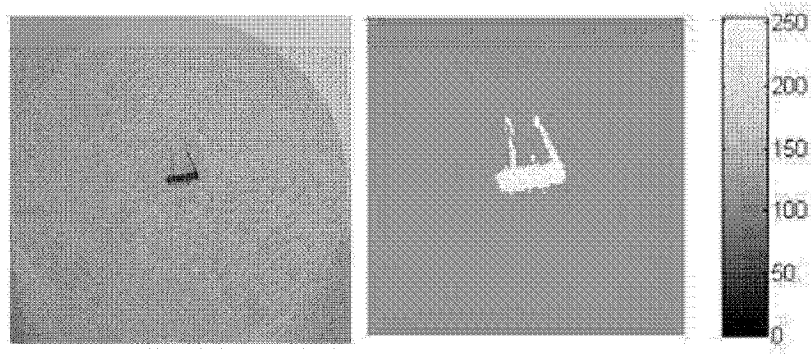


图 5

专利名称(译)	基于有限角度扫描的光声断层成像装置及方法		
公开(公告)号	CN102727259A	公开(公告)日	2012-10-17
申请号	CN201210262846.3	申请日	2012-07-26
[标]申请(专利权)人(译)	中国科学院自动化研究所		
申请(专利权)人(译)	中国科学院自动化研究所		
当前申请(专利权)人(译)	中国科学院自动化研究所		
[标]发明人	田捷 刘学彦 彭冬 马喜波 杨鑫		
发明人	田捷 刘学彦 彭冬 马喜波 杨鑫		
IPC分类号	A61B8/13		
代理人(译)	任岩		
其他公开文献	CN102727259B		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明涉及光声成像技术领域，公开了一种基于有限角度扫描的快速光声断层成像装置及方法，采用脉冲激光入射到成像样品产生光声信号，通过单元超声探测器在圆弧上有限位置采集光声信号，经信号放大器放大后，输入A/D转换器将声信号转化为电信号，最后传输到示波器完成数字信号采集；将成像样品光声信号输入计算机，计算机将光声信号进行滤波和傅里叶变换处理，根据实验条件提取光声信号频域信息，构建前向投影算子和测量矩阵，计算机基于快速稀疏算法对信号重建成像。本发明具有信号采集时间短，重建速度快，操作方便，适应性和扩展性好等优点。

