



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107405133 A

(43)申请公布日 2017.11.28

(21)申请号 201480084350.9

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2014.12.24

A61B 8/08(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.06.26

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/IB2014/003123 2014.12.24

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/102991 EN 2016.06.30

(71)申请人 超声成像

地址 法国爱昂普罗旺斯

(72)发明人 杰雷米·勃可夫

金-皮埃尔·亨里

(74)专利代理机构 上海天协和诚知识产权代理

事务所 31216

代理人 张彪

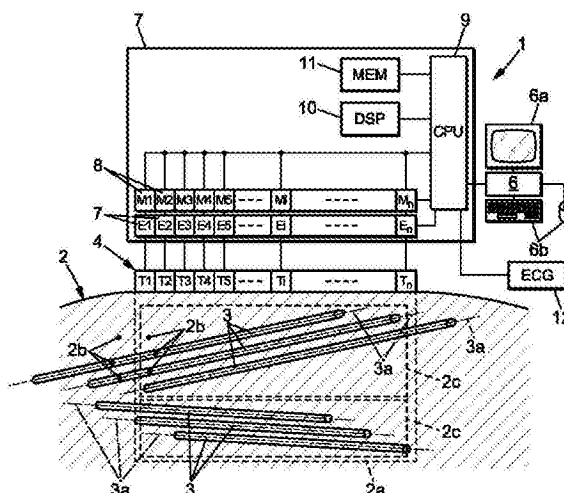
权利要求书4页 说明书12页 附图2页

(54)发明名称

适用于各向异性介质成像的剪切波弹性成像方法及装置

(57)摘要

适用于各向异性介质(2)中的观测场(2a)成像的剪切波弹性成像方法,包括:初始超声采集步骤,在该步骤过程中,在至少一个感兴趣区域(2c)中采集初始物理参数;空间表征步骤,在该步骤过程中,根据初始物理参数来确定各向异性介质(2)的一组空间特性;激发子步骤,在该子步骤过程中,根据所述一组空间特性在各向异性介质(2)内产生剪切波;以及观察子步骤,在该子步骤过程中,在观测场(2c)的若干点上同时观察所述剪切波的传播。



1. 适用于各向异性介质 (2) 中的观测场 (2a) 成像的剪切波弹性成像方法, 该方法包括:
 - a) 初始超声采集步骤, 在该步骤过程中, 在各向异性介质 (2) 中的至少一个感兴趣区域 (2c) 中采集至少一个初始物理参数;
 - b) 空间表征步骤, 在该步骤过程中, 根据初始物理参数来确定各向异性介质 (2) 的一组空间特性; 以及,
 - c) 剪切波成像步骤, 包括:
 - c1) 激发子步骤, 在该子步骤过程中, 根据所述一组空间特性在各向异性介质 (2) 内产生剪切波 (14); 以及,
 - c2) 观察子步骤, 在该子步骤过程中, 在观测场 (2c) 的若干点上同时观察所述剪切波 (14) 的传播。
2. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述各向异性介质的一组空间特性 (2) 包括下列内容中的至少一项:

在至少一个感兴趣区域 (2c) 中的各向异性特征 (3) 的方向、空间角度或空间位置, 以及,

在至少一个感兴趣区域 (2c) 中的优选的激发空间方向。
3. 根据权利要求1和2中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述初始物理参数是利用B型超声成像所采集到的各向异性介质 (2) 中的至少一个感兴趣区域 (2c) 的图像。
4. 根据权利要求1和2中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述初始超声采集步骤包括剪切波成像步骤, 所述剪切波成像步骤包括:
 - a1) 激发子步骤, 在该子步骤过程中, 通过至少一个剪切波方向在各向异性介质 (2) 内产生剪切波; 以及,
 - a2) 观察子步骤, 在该子步骤过程中, 在至少一个感兴趣区域 (2c) 的若干点上同时观察所述剪切波的传播, 以采集初始物理参数。
5. 根据权利要求4所述的方法, 其特征在于,

所述初始超声采集步骤包括与多个剪切波方向以及多个初始物理参数相关的多个剪切波成像步骤, 所述多个初始物理参数是在各向异性介质中的至少一个感兴趣区域中所采集到的,

多个剪切波成像步骤中的各个剪切波成像步骤包括:

 - a1) 激发子步骤, 在该子步骤过程中, 通过多个剪切波方向中的一个相关剪切波方向在各向异性介质 (2) 中产生剪切波; 以及,
 - a2) 观察子步骤, 在该子步骤过程中, 在至少一个感兴趣区域 (2c) 的若干点上同时观察所述剪切波的传播, 以采集多个初始物理参数中的一个相关初始物理参数。
6. 根据权利要求4和5中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述初始物理参数是利用剪切波成像所采集到的各向异性介质 (2) 中的感兴趣区域 (2c) 的图像。
7. 根据权利要求4和5中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述初始物理参数是利用剪切波成像在至少一个感兴趣区域 (2c) 中所采集到的剪切波传播参数。
8. 根据权利要求7所述的方法, 其特征在于, 所述剪切波传播参数选自剪切波速度、剪切模量 μ 、杨氏模量E、剪切弹性 μ_1 、剪切粘度 μ_2 。
9. 根据权利要求1至8中任一项所述的方法, 其特征在于, 在初始超声采集步骤a) 过程

中,采集分别与各向异性介质(2)中至少两个不同的感兴趣区域(2c)相关的至少两个初始物理参数;

其中,在空间表征步骤b)过程中,分别根据至少两个初始物理参数来确定分别与各向异性介质(2)中至少两个不同的感兴趣区域(2c)相关的至少两组空间特性,以及,

其中,在剪切波成像步骤c)过程中,

在激发子步骤c1)过程中,分别根据至少两组空间特性在各向异性介质(2)内产生至少两个剪切波(14);以及,

在观察子步骤c2)过程中,在观测场(2a)的若干点上同时观察所述至少两个剪切波(14)的传播。

10.根据权利要求1至9中任一项所述的方法,其特征在于,所述空间表征步骤b)包括通过对在初始超声采集步骤a)过程中所采集到的各向异性介质(2)的至少一个图像进行特征检测,以提取一组空间特性。

11.根据权利要求1至9中任一项所述的方法,其特征在于,所述空间表征步骤b)包括比较在初始超声采集步骤a)过程中所采集到的多个剪切波传播参数中的剪切波传播参数,以确定各向异性介质(2)中的首选的激发空间方向。

12.根据权利要求1至9中任一项所述的方法,其特征在于,所述空间表征步骤b)包括利用连接着中央处理单元(6)的显示装置(6a)向使用者展示在初始超声采集步骤a)过程中所采集到的各向异性介质(2)的图像,所述使用者利用连接着所述中央处理单元(6)的输入装置(6b)来指示各向异性介质的空间特性。

13.根据权利要求12所述的方法,其特征在于,所述使用者利用所述输入装置(6b)通过移动虚拟线的位置来指示各向异性介质(2)的空间特性,在所述显示装置(6a)上在向异性介质(2)的所述图像上方显示所述虚拟线,所述线表示各向异性介质的空间特性。

14.根据权利要求12所述的方法,其特征在于,所述使用者通过在显示装置(6a)上所显示的各向异性介质(2)的所述图像上利用超声系统所提供的常规的角度测量工具所测量到的各向异性介质(2)的空间特性的数值来指示空间特性,然后,所述使用者利用输入装置(6b)将所述数值输入中央处理单元(6)。

15.根据权利要求1至14中任一项所述的方法,其特征在于,通过利用受中央处理单元(6)所控制的换能器阵列在各向异性介质(2)中发射至少一束聚焦超声波来产生剪切波(14),

所述聚焦超声波的焦点(13a)的位置以及所述聚焦超声波的时序是通过中央处理单元(6)根据各向异性介质(2)的一组空间特性来确定的。

16.根据权利要求15所述的方法,其特征在于,确定焦点(13a)的位置以及产生剪切波(14)的多个聚焦超声波的时序,以便所述剪切波(14)的波前基本垂直于以下方向中的一个方向:

各向异性介质(2)中的各向异性特征(3)的方向,以及,

各向异性介质(2)中的首选的激发空间方向。

17.根据权利要求16所述的方法,其特征在于,确定焦点(13a)的位置以及产生剪切波(14)的多个聚焦超声波的时序,以便所述剪切波(14)的传播方向基本与下列方向中的一个方向相一致:

各向异性介质 (2) 中的各向异性特征 (3) 的方向, 以及,
各向异性介质 (2) 中的首选的激发空间方向。

18. 根据权利要求1至17中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述观察子步骤c2) 包括以下操作:

c2-1) 使彼此相互独立受控的换能器阵列 (4) 向各向异性介质 (2) 中发射一系列超声波, 其空间覆盖范围和时序使得所述超声波呈现出与观测场 (2a) 中所传播的剪切波 (14) 至少有局部时空重叠; 以及,

c2-2) 通过所述换能器阵列 (4) 实时检测和记录从各向异性介质 (2) 所接收到的声波信号, 所述信号包含与所述各向异性介质 (2) 中的散射体 (2b) 相互作用的超声波所产生的回波,,

剪切波成像步骤c) 进一步包括至少一个处理子步骤c3), 在该子步骤中:

c3-1) 对在操作c2-2) 过程中从各向异性介质 (2) 所连续接收到的声波信号进行处理, 以便确定剪切波 (14) 的连续传播图像; 以及,

c3-2) 在观测场 (2a) 的不同点上确定各向异性介质的至少一个移动参数。

19. 根据权利要求18所述的方法, 其特征在于,

在初始超声采集步骤过程中, 在各向异性介质 (2) 内产生沿着至少两个剪切波方向传播的剪切波, 以及,

在处理子步骤过程中, 按照至少两个剪切波方向对从各向异性介质所接收到的声波信号进行滤波, 以便确定所述至少一个初始物理参数。

20. 根据权利要求18或19所述的方法, 其特征在于, 所述移动参数是各向异性介质 (2) 的位移。

21. 根据权利要求18至20中任一项所述的方法, 其特征在于, 在所述操作c2-1) 过程中, 以至少300次/秒的速率发射所述非聚焦超声压缩波。

22. 根据权利要求18至21中任一项所述的方法, 其特征在于, 在激发子步骤c1) 过程中所发射的聚焦超声波的频率 f 在0.1MHz至100MHz的范围之中, 发射持续时间为 k/f 秒, 其中, k 是50至5000范围内的整数, f 用Hz表示。

23. 根据权利要求18至22中任一项所述的方法, 其特征在于, 在激发子步骤c1) 过程中发射的聚焦超声波的频率在0.5MHz至15MHz的范围之中, 并且所述聚焦超声波是在由间歇时间分隔开的一系列发射时间发射的, 发射时间按照每秒发射10至1000次的速率彼此衔接。

24. 根据权利要求18至23中任一项所述的方法, 其特征在于, 在激发子步骤c1) 过程中发射的聚焦超声波是两个单色信号的线性组合 (尤其是其总和), 所述单色信号的频率分别为 f_1 和 f_2 , 且 $20\text{Hz} \leq |f_1 - f_2| \leq 1000\text{Hz}$ 。

25. 根据权利要求18至24中任一项所述的方法, 其特征在于, 在激发子步骤c1) 过程中发射的聚焦超声波同时聚焦于多个焦点。

26. 根据权利要求18至25中任一项所述的方法, 其特征在于, 图像处理子步骤c3) 之后是映射子步骤c4), 在该子步骤中, 根据移动参数随时间的变化, 在观测场 (2a) 的至少某些点上计算至少一个剪切波传播参数, 以便确定观测场 (2a) 中所述传播参数的映射。

27. 根据权利要求26所述的方法, 其特征在于, 在映射子步骤c4) 过程中计算的剪切波

传播参数选自剪切波速度、剪切模量、杨氏模量、剪切波衰减、剪切弹性、剪切粘度、力学松弛时间和局部应变的反演。

28. 根据权利要求26或27所述的方法, 其特征在于, 在连续的激发子步骤c1) 过程中发射多个不同的聚焦超声波的同时连续地重复子步骤c1) 至c4), 然后, 把连续映射子步骤c4) 过程中得到的映射相结合, 以便计算观测场 (2a) 的组合映射。

29. 根据权利要求26至28中任一项所述的方法, 其特征在于, 至少重复一次步骤b) 和c), 将在步骤c) 中第n次迭代所获得的观测场 (2a) 中传播参数映射用作步骤b) 的第n+1次迭代的初始物理参数。

30. 实施根据权利要求1至29中任一项的剪切波弹性成像方法的成像装置, 适用于各向异性介质 (2) 中的观测场 (2a) 的成像, 所述装置包括由至少一个中央电子单元 (6) 所控制的彼此相互独立的换能器阵列 (4), 所述中央电子单元适合:

- 在各向异性介质 (2) 中的至少一个感兴趣区域 (2c) 中采集至少一个初始物理参数;
- 根据初始物理参数来确定各向异性介质 (2) 的一组空间特性;
- 根据所述一组空间特性在各向异性介质 (2) 内产生剪切波 (14); 以及,
- 在观测场 (2c) 中的若干点上同时观察所述剪切波 (14) 的传播。

适用于各向异性介质成像的剪切波弹性成像方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及利用剪切波的成像方法及装置,更准确地说,涉及适用于各向异性介质成像的剪切波弹性成像方法及装置。

背景技术

[0002] US7,252,004描述了适用于粘弹性介质成像的剪切波弹性成像方法的一个实例。在粘弹性介质均匀的情况下,US7,252,004的方法完全令人满意。然而,在粘弹性介质是含有纤维的各向异性介质的情况下,则图像和测量的重现性和可靠性都不是最理想的。

[0003] 实际上,利用剪切波弹性成像所获得的测量和图像都是通过对观察到的粘弹性介质承受剪切波所导致的位移和/或变形的计算得到的。

[0004] 可惜,剪切波在含有纤维的各向异性介质中的传播与均匀介质不同,因为其传播参数不仅取决于介质的物理特性,还取决于剪切波的波前与纤维方向的相对角度。

[0005] 因此,根据剪切波的传播方向与纤维方向的相对角度,剪切波传播参数的测量值是变化的并因此会得到不可靠及不可重现的剪切波弹性成像测量和图像。

[0006] 本发明的目的旨在改善这种现状。

发明内容

[0007] 为此目的,根据本发明,适用于各向异性介质成像的剪切波弹性成像方法包括:

[0008] a) 初始超声采集步骤,在该步骤过程中,在各向异性介质中的至少一个感兴趣区域中采集至少一个初始物理参数;

[0009] b) 空间表征步骤,在该步骤过程中,根据初始物理参数来确定各向异性介质的一组空间特性;以及,

[0010] c) 剪切波成像步骤,包括:

[0011] c1) 激发子步骤,在该子步骤过程中,根据所述一组空间特性在各向异性介质内产生剪切波;以及,

[0012] c2) 观察子步骤,在该子步骤过程中,在观测场的若干点上同时观察所述剪切波的传播。

[0013] 在某些实施例中,还可以利用下列特征中的一项或多项:

[0014] -各向异性介质的一组空间特性包括下列内容中的至少一项:在至少一个感兴趣区域中的各向异性特征的方向、空间角度或空间位置,以及在至少一个感兴趣区域中的首选的激发空间方向;

[0015] -初始物理参数是利用B型超声成像所采集到的各向异性介质中的至少一个感兴趣区域的图像;

[0016] -初始超声采集步骤包括剪切波成像步骤,所述剪切波成像步骤包括:

[0017] 激发子步骤,在该子步骤过程中,通过至少一个剪切波方向在各向异性介质内产生剪切波,以及,

[0018] 观察子步骤,在该子步骤过程中,在至少一个感兴趣区域的若干点上同时观察所述剪切波的传播,以采集初始物理参数;

[0019] -初始超声采集步骤包括与多个剪切波方向和多个初始物理参数相关的多个剪切波成像步骤,所述多个初始物理参数是在各向异性介质中的至少一个感兴趣区域中采集到的,多个剪切波成像步骤中的每个剪切波成像步骤都包括激发子步骤和观察子步骤,在所述激发子步骤过程中,通过多个剪切波方向中的相关剪切波方向在各向异性介质中产生剪切波,在所述观察子步骤过程中,在至少一个感兴趣区域的若干点上同时观察所述剪切波的传播,以采集多个初始物理参数中的相关初始物理参数;

[0020] -所述初始物理参数是利用剪切波成像所采集到的各向异性介质中的感兴趣区域的图像;

[0021] -所述初始物理参数是利用剪切波成像在至少一个感兴趣区域中所采集到的剪切波传播参数;

[0022] -所述剪切波传播参数选自剪切波速度、剪切模量 μ 、杨氏模量 E 、剪切弹性 μ_1 、剪切粘度 μ_2 ;

[0023] -在初始超声采集步骤过程中,采集分别与各向异性介质中至少两个不同的感兴趣区域相关的至少两个初始物理参数,在空间表征步骤过程中,分别根据至少两个初始物理参数来确定分别与各向异性介质中至少两个不同的感兴趣区域相关的至少两组空间特性,以及在剪切波成像步骤过程中,在激发子步骤过程中,分别根据至少两组空间特性在各向异性介质内产生至少两个剪切波,以及,在观察子步骤过程中,在观测场的若干点上同时观察所述至少两个剪切波的传播;

[0024] -空间表征步骤包括通过对在初始超声采集步骤过程中所采集到的各向异性介质的至少一个图像进行特征检测以提取一组空间特性;

[0025] -空间表征步骤包括比较在初始超声采集步骤过程中所采集到的多个剪切波传播参数中的剪切波传播参数,以确定各向异性介质中的首选的激发空间方向;

[0026] -空间表征步骤包括利用连接着中央处理单元的显示装置向使用者展示在初始超声采集步骤过程中所采集到的各向异性介质的图像,所述使用者利用连接着所述中央处理单元的输入装置指出各向异性介质的空间特性;

[0027] -所述使用者利用所述输入装置通过移动虚拟线的位置来指出各向异性介质的空间特性,在所述显示装置上在各向异性介质的所述图像上方显示所述虚拟线,所述线表示各向异性介质的空间特性;

[0028] -所述使用者通过在显示装置上所显示的各向异性介质的所述图像上,利用超声系统提供的常规的角度测量工具,来测定各向异性介质的空间特性的数值,以指示空间特性,然后,所述使用者利用输入装置把所述数值输入中央处理单元;

[0029] -通过利用受中央处理单元所控制的换能器阵列在各向异性介质中发射至少一束聚焦的超声波来产生剪切波,所述聚焦超声波的焦点位置以及所述聚焦超声波的时序是通过中央处理单元根据各向异性介质的一组空间特性来确定的;

[0030] -确定产生剪切波的多个聚焦超声波的焦点位置及时序,使得所述剪切波的波前基本垂直于以下方向中的一个方向:各向异性介质中的各向异性特征的方向和各向异性介质中的首选的激发空间方向;

[0031] -确定产生剪切波的多个聚焦超声波的焦点位置及时序,使得所述剪切波的传播方向基本与下列方向中的一个方向相一致:各向异性介质中的各向异性特征的方向和各向异性介质中的首选的激发空间方向;

[0032] -观察子步骤包括以下操作:

[0033] c2-1) 使彼此相互独立受控的换能器阵列向各向异性介质中发射一系列超声波,其空间覆盖范围和时序使得所述超声波与观测场中所传播的剪切波呈现出至少局部时空重叠,以及,

[0034] c2-2) 通过所述换能器阵列来实时检测和记录从各向异性介质所接收到的声波信号,所述信号包含超声波与所述各向异性介质中的散射体相互作用所产生的回波,

[0035] 剪切波成像步骤c) 进一步包括至少一个处理子步骤c3),在该子步骤中:

[0036] c3-1) 对在操作c2-2) 过程中从各向异性介质所连续接收到的声波信号进行处理,以便确定剪切波的连续传播图像,以及,

[0037] c3-2) 在观测场的不同点上确定各向异性介质的至少一个移动参数;

[0038] -在初始超声采集步骤过程中,在各向异性介质内产生沿着至少两个剪切波方向传播的剪切波,以及,

[0039] 在处理子步骤过程中,按照至少两个剪切波方向对从各向异性介质所接收到的声波信号进行滤波,从而确定所述至少一个初始物理参数;

[0040] -所述移动参数是各向异性介质的位移;

[0041] -在所述操作c2-1) 中,以至少300次/秒的速率来发射所述非聚焦的超声压缩波;

[0042] -在激发子步骤过程中所发射的聚焦超声波频率 f 在0.1MHz至100MHz的范围之中,发射持续时间为 k/f 秒,其中, k 是50至5000范围内的整数, f 用Hz表示;

[0043] -在激发子步骤过程中所发射的聚焦超声波的频率在0.5MHz至15MHz的范围之中,并且所述聚焦超声波是在由间歇周期分隔开的一系列发射周期来发射的,发射周期按照每秒发射10次至1000次的速率彼此衔接;

[0044] -在激发子步骤c1) 过程中所发射的聚焦超声波是两个单色信号的线性组合,所述单色信号的频率分别为 f_1 和 f_2 且 $20\text{Hz} \leq |f_1 - f_2| \leq 1000\text{Hz}$;

[0045] -在激发子步骤过程中所发射的聚焦超声波同时聚焦于多个焦点;

[0046] -图像处理子步骤之后是映射子步骤,在该子步骤中,根据移动参数随时间的变化,计算出在观测场的至少某些点上至少一个剪切波传播参数,以便确定所述传播参数在观测场中映射;

[0047] -在映射子步骤过程中计算得到的剪切波传播参数选自剪切波速度、剪切模量、杨氏模量、剪切波衰减、剪切弹性、剪切粘度、力学松弛时间和局部应变的反演;

[0048] -子步骤连续重复,在连续的激发子步骤过程中发射多个不同的聚焦超声波,然后,组合在连续映射子步骤过程所获得的映射,以便计算出观测场的组合映射;

[0049] -至少重复一次步骤b) 和c),把在步骤c) 中第 n 次迭代所获得的观测场中传播参数的映射用作步骤b) 的第 $n+1$ 次迭代的初始物理参数。

[0050] 本发明另一目的是适用于实施上文详细描述的剪切波弹性成像方法的成像装置,其适用于各向异性介质中的观测场成像,所述装置包括由至少一个中央电子单元所控制的彼此相互独立的换能器阵列,所述中央电子单元适合:

- [0051] -在各向异性介质中的至少一个感兴趣区域中采集至少一个初始物理参数;
- [0052] -根据初始物理参数来确定各向异性介质的一组空间特性;
- [0053] -根据所述一组空间特性在各向异性介质内产生剪切波;以及,
- [0054] -在观测场中的若干点上同时观察所述剪切波的传播。
- [0055] 通过这些特征,根据各向异性介质的空间特性就可以确定剪切波特征,尤其是剪切波的波前和传播方向。这就极大地提高了通过剪切波弹性成像所获得的图像和测量的质量、可靠性和重现性。

附图说明

- [0056] 本发明的其它特征和优点将通过以下作为非限制性实例列出的本发明一个实施例的详细说明以及参考附图而显而易见。
- [0057] 在附图中:
- [0058] -图1是本发明一个实施例的剪切波成像装置的示意图;
- [0059] -图2a、图2b和图2c是通过多个不同聚焦超声波在各向异性介质中所产生的多个剪切波的示意图。

具体实施方式

- [0060] 图1所示的装置1适用于成像在各向异性介质2中的观测场2a。
- [0061] 各向异性介质2包含各向异性特征3,其呈现出可识别的空间扩展方向3a。各向异性特征3可以是,例如,纤维、组织界面或各向异性组织、血管、神经、比如细长细胞或小器官的各向异性成份,以及更普遍而言,是组织尤其是活体组织的任何空间定向成份。
- [0062] 例如,各向异性介质2可以是,例如,包括肌肉或肌腱在内的患者身体的一部分。这种组织包括纤维3形式的各向异性特征3,例如,由肌束膜包围的肌束,或者肌腱、韧带和筋膜中的胶原纤维阵列。这种纤维3具有强烈的各向异性并且呈现出可识别的空间扩展方向3a,因此使介质2具有各向异性。某些纤维3还可以组成通常沿着平行方向3a所延伸的纤维束。
- [0063] 更准确地说,装置1用于执行各向异性介质2的剪切波弹性成像,从而获得观测场2a中剪切波传播参数的图像或测量。
- [0064] 常规的剪切波弹性成像测量或成像是通过以下步骤进行的:
- [0065] -使机械剪切波14穿过各向异性介质2传播,尤其是穿过观测场2a传播;以及,
- [0066] -通过散射体2b上的超声波反射来观察在观测场2a中的剪切波14的传播,所述散射体2b反射超声波并且自然地包含在生物组织中。
- [0067] 粒子2b可以由各向异性介质2的任何非均匀性所构成,例如,胶原粒子,或者更普遍而言,由密度不同于周围介质密度的非均匀性所构成。
- [0068] 然后,根据剪切波穿透时所观察到的组织的位移和/或变形来处理剪切波弹性成像的测量和图像。
- [0069] 正如前面提到的,与均匀介质相比较,剪切波在各向异性介质中的传播是不同的。
- [0070] 尤其是,剪切波的传播不仅取决于介质2的物理特性,还取决于剪切波的波前或传播方向14a与在各向异性介质2中的偏好方向3a之间的角度。

[0071] 因此,例如,根据剪切波传播方向14a与各向异性特征3的相对角度,剪切波14传播参数的测量会有所变化,因此所得到剪切波弹性成像测量和图像是不可靠的而且不可重现的。

[0072] 文件US-B2-7252004已经详细说明了比如通过装置1执行的剪切波成像步骤c)的结构和基本操作方式,下文将对其进行简短的回忆。

[0073] 例如,装置1可包括:

[0074] -超声换能器阵列4,例如,线性阵列典型地包括n个超声换能器 T_1-T_n 且沿着轴并列排列着,如同常规的回波探测器所熟知的,(阵列4因此适合进行观测场二维(2D)成像,但是,阵列4也可以是适合进行观测场3D成像的二维阵列);换能器的数量n大于1,例如,几十个(例如100至300个);换能器 T_1-T_n 发送超声波脉冲,所述脉冲是回波描记术中通常使用类型的脉冲,例如,其频率在0.5MHz至100MHz范围内,优选在0.5MHz至15MHz范围内,例如约为2.5MHz;

[0075] -电子探头5,控制换能器阵列4并采集其信号;

[0076] -微型计算机6,控制电子探头5并查看由电子探头所得到的超声图像,所述计算机6包括显示装置6a以及输入装置6b,例如所述显示装置是屏幕,比如所述输入装置是键盘、鼠标或者其它用户界面。

[0077] 电子探头5和微型计算机6在这里称之为装置1的控制系统。该控制系统可由两个以上装置所构成或者由单独一个电子设备所构成,以实现电子探头5和微型计算机6的所有功能。

[0078] 电子探头5可包括,例如:

[0079] -n个模拟/数字转换器7(E_1-E_n),各自分别连接着换能器阵列4的n个换能器(T_1-T_n);

[0080] -n个缓冲存储器8(M_1-M_n),各自分别连接着n个模拟/数字转换器7;

[0081] -中央处理单元9(CPU),与缓冲存储器8和微型计算机6通讯;

[0082] -数字信号处理器11(DSP),连接着中央处理单元9;

[0083] -存储器10(MEM),连接着中央处理单元8。

[0084] 换能器 T_1-T_n 彼此相互独立地受中央处理单元9控制。换能器 T_1-T_n 因此可以选择性地发射:

[0085] -非聚焦超声波;

[0086] -或者,集中在观测场2a的一个或多个点的聚焦超声波。

[0087] “非聚焦超声波”一词在这里可理解为照射整个观测场2a的任何非聚焦波,例如:

[0088] -“平面的”超声压缩波(即,其波前在X,Y平面中直线运动),或者任何类型的非聚焦波;

[0089] -通过不同的换能器 T_1-T_n 所发射的随机声波信号产生的波;

[0090] -发散波,例如球面波;

[0091] -同时聚焦在多个焦点的波;

[0092] -弱聚焦波(称为“脂肪”传播聚焦:比焦距/孔径 >2.5);

[0093] -或者更普遍而言,与利用单个焦点位置的常规的聚焦不对应且焦距/孔径 <2.5 的任何类型的传输波。

[0094] 在装置1的操作过程中,换能器阵列4处于接触各向异性介质2的位置,例如,与患者皮肤接触。

[0095] 装置1的操作方式受控制系统控制,例如,所述控制系统是针对该操作方式编程控制的中央处理单元9和/或计算机6。这两个装置在下文中称为装置1的控制系统(当然,控制系统可以不同于本文所述的具体实例,尤其是可由前文所述的单独一个电子设备所构成或者由两个以上电子设备所构成)。

[0096] 装置1进行剪切波成像的操作这里可结合剪切波成像步骤c) 进行描述,但是所述装置1的操作也适用于初始超声采集步骤a) 的实施例,在所述初始超声采集步骤a) 中,通过剪切波成像或弹性成像来采集初始物理参数,下文对此作进一步详细描述。

[0097] 对装置1的控制系统6、9进行编程,以便连续地执行多个子步骤,从激发子步骤c1) 开始,在所述激发子步骤c1) 过程中,控制系统6、9通过阵列4将其发射(可通过所有或部分换能器 T_1 - T_n 发射聚焦波13),使至少一个聚焦超声波13聚焦于各向异性介质2的焦点13a,从而在观测场2a产生剪切波14;

[0098] 尤其是,如下文进一步详细说明的,在激发子步骤c1) 过程中发射的聚焦超声波13可以同时或者不同时聚集于多个点13a,以便所产生的剪切波14呈现理想的波形。

[0099] 因此,有可能产生平面的剪切波14,或者相反,剪切波是聚焦的且照射各向异性介质2的观测场2a中的理想区域。

[0100] 尤其是,剪切波14可以呈现受焦点13a的位置以及发射聚焦超声波13的时序控制的剪切波的波前和剪切波方向14a。

[0101] 参考图2a,通过同时或在较短时间段内发射多个聚焦超声波13可以产生特定剪切波14,所述超声波13具有沿着各向异性介质2中的一条线对齐的焦点13a。

[0102] 所产生的剪切波14的波前基本平行于焦点13a的对齐线且其传播方向14a基本垂直于所述线。

[0103] 参考图2b,阐释了通过在把每次发射分隔开的较长时间段内发射多个聚焦超声波13所产生的特定剪切波14,所述超声波13具有沿着各向异性介质2中的一条线对齐的焦点13a。

[0104] 所产生的剪切波14的波前相对于焦点13a的对齐线所形成的角大于图2a所阐释的上述剪切波。

[0105] 现在参考图2c,阐释了通过发射多个聚焦超声波13所产生的另一个特定剪切波14,所述聚焦超声波13具有沿着各向异性介质2中一条不同的线对齐的焦点13a,所述线相对于垂直阵列4的垂直方向而倾斜。

[0106] 因此,图2a、图2b和图2c阐释了几种不同的剪切波14,所述剪切波可由装置1的控制系统6、9通过改变聚焦超声波13焦点13a的位置以及发射聚焦超声波13的时序产生。

[0107] 也可以产生其它类型的剪切波14,例如,通过改变聚焦超声波13焦点13a的位置以及发射聚焦超声波13的时序,装置1的控制系统6、9可以产生沿着两个或多个剪切波方向传播的剪切波14。“两个剪切波方向”的含义可理解为所述剪切波方向不在同一直线上。

[0108] 在激发子步骤c1) 过程中发射的聚焦超声波可以是单色波,其频率范围 f 在0.5MHz在15MHz之间,例如,约等于2.5MHz,发射所述聚焦超声波的持续时间为 k/f 秒,其中 k 是50至5000范围内的整数(例如,约等于500), f 用Hz表示。这种波有可能在由间歇时间分隔开的一

系列发射时间来发射,发射时间按照每秒发射10至1000次的速率彼此衔接。

[0109] 在一个变体中,在激发子步骤c1)过程中发射的聚焦超声波是两个单色信号的线性组合(尤其是其总和),所述单色信号的频率分别为 f_1 和 f_2 ,使得 $20\text{Hz} \leq |f_1 - f_2| \leq 1000\text{Hz}$,从而产生调制频率为 $|f_1 - f_2|$ 的调幅波。

[0110] 装置1然后执行观察子步骤c2),在该子步骤过程中,在观测场2a)的多个点同时观察剪切波14的传播,该观察步骤包括下列操作:

[0111] c2-1) 控制系统6、9使阵列4向各向异性介质发射一系列非聚焦超声压缩波(这些非聚焦波可由全部或部分换能器 T_1 - T_n 来发射),发射速率至少为300次/秒,例如,至少为500次/秒(在步骤a)中发射的聚焦超声波的聚焦和时序以及所述非聚焦超声波的时序,使得至少某些所述非聚焦超声波在观测场中传播剪切波的过程中到达观测场);

[0112] c2-2) 控制系统6、9使阵列4检测从各向异性介质2所收到的声波信号(该检测可由阵列4的全部或部分换能器来执行),所述信号包括由非聚焦超声压缩波与观测场中的散射体2b相互作用所产生的回波,这些回波(直接或间接地)与各向异性介质2位移的连续图像相对应;将所检测到的信号实时记录在缓冲存储器 M_1 - M_n 中;

[0113] 装置1至少进行一次处理子步骤c3),在所述子步骤过程中:

[0114] c3-1) 控制系统6、9处理在操作c2-2)过程中从各向异性介质2所接收到的连续声波信号,以确定连续的传播图像;以及,

[0115] c3-2) 控制系统6、9确定在观测场2a)的不同点上的各向异性介质2的至少一个移动参数。

[0116] 应该注意的是,可以省略上述操作c3-1):更普遍而言,本发明的方法不需要确定所传播的图像,而且控制系统6、9可以通过任何方式来确定所述移动参数。

[0117] 在操作c2-1)过程中,例如,所述操作可持续0.1至180秒,使之有可能按照500至10,000次/秒的范围内的速率来发射非聚焦超声压缩波,所述速率优选为1000至5000次/秒(所述速率通过穿过患者身体2的压缩波的往返行程时间来限制:在探头6发送新的压缩波之前必须接收到压缩波所产生的所有回波)。

[0118] 在初始超声采集步骤过程中发射的剪切波的实施例,传播沿着两个或多个剪切波方向,可以在处理子步骤过程中按照所述剪切波方向对从各向异性介质所接收到的声波信号进行滤波,以便确定所述初始物理参数。

[0119] 在一个实施例中,对从各向异性介质所接收到的声波信号进行滤波,以便确定分别与两个或多个剪切波方向相关联的两个或多个初始物理参数。

[0120] 这种滤波操作可以是,例如,在操作c2-2)过程中从各向异性介质2所接收到的连续声波信号的时间滤波或空间滤波,或者,在操作c3-2)过程中所确定的移动参数的时间滤波或空间滤波。

[0121] 每个非聚焦超声压缩波都按照远高于剪切波的传播速度在患者身体2中传播(例如,在人体内约为1500m/s),并且与反射粒子2b相互作用,因此,在信号中产生回波或其它类似干扰,这在回波描记术领域内被称为“斑点噪声”。

[0122] 每次发射非聚焦超声压缩波之后,由换能器 T_1 - T_n 在子步骤b2)过程中拾取斑点噪声。对每个换能器 T_i 在第 j 次发射之后所拾取到的信号 $s_{ij}(t)$ 以高频率(例如,30MHz至100MHz)进行初始采样以及通过与换能器 T_i 相对应的模拟/数字转换器 E_i 对其进行实时数字

化(例如,以12比特)。

[0123] 然后,将按照这种方式采样和数字化的信号 $s_{ij}(t)$ 同样实时地储存在与换能器 T_i 相对应的缓冲存储器 M_i 中。

[0124] 举例来说,各个存储器 M_i 的容量可约为128兆字节(MB)并且包含对应第 $j=1$ 至 p 次连续发射所接收到的所有信号 $s_{ij}(t)$ 。

[0125] 在延迟时间中,在储存与剪切波同一次传播相对应的所有信号 $s_{ij}(t)$ 之后,中央处理单元9利用与子步骤c1)相对应的常规路径形成步骤来处理这些信号(或者由诸如加法电路这类其它电路对其进行处理,或者由计算机6自身来处理所述信号)。

[0126] 由此,产生分别与第 j 次发射之后的观测场图像相对应的信号 $S_j(x, y)$ 。

[0127] 例如,有可能通过下面公式来确定信号 $S_j(t)$:

$$[0128] \quad S_j(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x, y) \cdot S_{ij}[t(x, y) + d_i(x, y)/V]$$

[0129] 其中:

[0130] $-S_{ij}$ 是在第 j 次发射超声压缩波之后由换能器 i 探测的原始信号;

[0131] $-t(x, y)$ 是超声压缩波到达观测场所用的时间,所述观测场的坐标为 (x, y) ,第 j 次发射开始时 $t=0$;

[0132] $-d_i(x, y)$ 是坐标为 (x, y) 的观测场的点与第 i 个换能器之间的距离或者是所述距离的近似值;

[0133] $-V$ 是观察中的超声压缩波在粘弹性介质中的平均传播速度;以及,

[0134] $-\alpha_i(x, y)$ 是考虑了衍射控像法的加权系数(实际上,在许多情况下,可以假设 $\alpha_i(x, y)=1$)。

[0135] 在观测场是三维观测场的情况下(通过换能器的二维阵列),空间坐标 (x, y) 用 (x, y, z) 来代替,应用上述公式需增加必要的变更。

[0136] 在可选的路径形成步骤之后,中央单元9将图像信号 $S_j(x, y)$ 存储于中央存储器M中(或者,如果图像只有1个维度,为 $S_j(x)$;或者,在3D图像的情况下,为 $S_j(x, y, z)$),各个图像分别与第 j 次发射相对应。如果由计算机自身来处理图像,则将这些信号还可以储存在于计算机6中。

[0137] 这些图像随后在操作c3-2)中的延迟时间里通过相关以及有利地通过成对的交叉相关或者最好通过参考图像进行处理,如US-B2-7252004所述。

[0138] 例如,可以在数字信号处理器11中或者可以在中央单元9或计算机6中进行编程来执行上述交叉相关。

[0139] 在这种交叉相关处理过程中,使交叉相关函数 $\langle S_j(x, y), S_{j+1}(x, y) \rangle$ 最大化,以便确定每个粒子2b承受超声回波所引起的位移。

[0140] US-B2-7252004列出了这种交叉相关计算的实例。

[0141] 这就产生了一组位移矢量 $\vec{u}(\vec{x}, t)$,所述位移矢量是由剪切波在剪切波的作用下在各向异性介质2观测场2a的各个位置 $\vec{x}$ 上产生的(在本文所述的实例中,这些位移矢量可选择性地减少为单个分向量)。

[0142] 将这组位移矢量存储于存储器M或计算机6中,并且例如,尤其是可以通过计算机的屏幕4a以慢动画的形式对其进行显示,在所述慢动画中,通过比如灰度或色阶这样的光

学参数来阐释位移的数值。

[0143] 因此,可以清楚地看到剪切波在各向异性介质2中具有不同特性的区域之间的传播差异。

[0144] 剪切波传播的动画还可以叠加到常规的回波描记术图像上,所述常规的回波描记术图像也可以由上述装置1产生。

[0145] 此外,还可以针对观测场2a中的各个点来计算各向异性介质2的变形,而不是位移,所述变形也就是矢量,其分向量是分别与空间变量(在所述实例中为X和Y坐标)有关的位移矢量的导数。这些变形矢量可以像位移矢量一样用于以动画的形式来清晰地查看剪切波的传播,而且还具有在观察中消除换能器阵列4相对于患者身体的位移的优点。

[0146] 通过位移或变形字段,计算机6(或者更普遍而言,控制系统6、9)可有利地继续进行映射子步骤c4),在所述映射子步骤c4)过程中,根据移动参数(位移或变形)随时间在观测场X,Y(或者对于换能器二维阵列而言,为X,Y,Z)中改变的方式,计算在使用者操作计算机6时所选择的观测场2a中的某些点(至少为1个点),或者在整个观测场2a中的剪切波的至少一个传播参数。

[0147] 例如,在映射子步骤c4)过程中,所计算的剪切波的传播参数选自:剪切模量 μ ,或者杨氏模量 $E=3\mu$,或者剪切波的传播速度 c_s ($c_s = \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$,其中 ρ 是组织的密度),或者剪切弹性 μ ,如US-B2-7252004所详细说的,或者局部应变的反演。这种传播参数表示构成观测场2a的各向异性介质的弹性。

[0148] 例如,该传播参数可由计算机6在多个不同时刻以每秒多次地(例如,至少以每秒5次的速率,例如,至少每秒10次)重复计算。

[0149] 在剪切波成像步骤c)之前,装置1进行多个步骤,现在对这些步骤进行进一步的详细说明。

[0150] 在初始成像步骤a)过程中,针对各向异性介质2中至少一个感兴趣区域2c采集至少一个初始物理参数。

[0151] 在第一个实施例中,利用B型超声成像来采集初始物理参数。尤其是,初始物理参数可以是各向异性介质2中感兴趣区域2c的图像。

[0152] 为此目的,控制系统6、9可以按照标准超声方式利用换能器阵列4对观测场2a进行常规的B型超声成像。标准超声成像包括通过集中在指定点的柱面波对介质进行声透射。籍助于这单次声透射的背散射回波,利用动态接收波束成形过程来计算图像的完整线条。

[0153] 在本发明的第二个实施例中,利用剪切波弹性成像或成像来采集初始物理参数。

[0154] 在该第二个实施例中,初始物理参数可以是剪切波传播参数或者是通过剪切波成像所获得的图像。

[0155] 尤其是,控制系统6、9可以通过执行与前文所述的剪切波成像步骤c)相似的剪切波弹性成像或成像来采集图像。

[0156] 因此,初始超声采集步骤可包括剪切波成像步骤,所述剪切波成像步骤包括:

[0157] a1) 激发子步骤,在该子步骤过程中,通过一个剪切波方向在各向异性介质内产生剪切波;以及,

[0158] a2) 观察子步骤,在该子步骤过程中,在至少一个感兴趣区域的若干点上同时观

察所述剪切波的传播,以便采集初始物理参数。

[0159] 有利的是,初始成像步骤a)可包括采集多个初始物理参数,分别包括步骤a1)和步骤a2)。

[0160] 因此,可以在一个或多个兴趣点2b或者在各向异性介质的感兴趣区域2c内来测量多个剪切波传播参数。

[0161] 也可以采集各向异性介质的感兴趣区域的多个图像。

[0162] 剪切波传播参数可以选自,例如,剪切波速度、剪切模量 μ 、杨氏模量E、剪切弹性 μ_1 、剪切粘度 μ_2 。

[0163] 然后,在空间表征步骤b)过程中,根据一个初始物理参数或多个初始物理参数来确定各向异性介质中的感兴趣区域的一组空间特性。

[0164] 例如,这组空间特性可包括各向异性特征3的方向或各向异性特征3的空间角度,比如其参考面或线为换能器阵列4的扩展方向,例如,纤维方向3a与换能器阵列4的扩展方向的空间角度。这组空间特性还可以包括各向异性介质2中各向异性特征3的空间位置或定位,尤其是,所述各向异性特征在感兴趣区域二维(2D)或三维(3D)成像中的空间位置。这组空间特性还可以包括感兴趣区域中的首选的激发空间方向。

[0165] 有利的是,在本发明第一个实施例中,初始物理参数是B型图像或剪切波图像,并且可以自动执行空间表征步骤b)。尤其是,步骤b)因此包括通过对在初始超声采集步骤过程中所采集到的各向异性介质中的观测场的至少一个图像进行特征检测,以提取一组空间特性。

[0166] 在本发明第一个实施例的一个变体中,空间表征步骤b)可手动地执行。

[0167] 为此目的,可以在显示装置6a上显示B型图像或剪切波图像,以便使用者查看,例如,使用者为医师或者是使用装置1的操作员。

[0168] 所述使用者可以利用连接着所述中央处理单元6、9的输入装置6b来指示纤维3的空间特性。

[0169] 在本发明的第一个变体中,使用者通过移动虚拟线的位置来指示纤维3的空间特性,在所述显示装置上在各向异性介质的所述图像上方显示所述虚拟线,所述线表示纤维的方向。例如,使用者可以利用输入装置6b来移动所述线,例如,所述输入装置为鼠标和键盘。

[0170] 在另一个变体中,使用者根据显示装置上所显示的各向异性介质图像来测量纤维空间角度的数值。例如,使用者可以利用每个标准超声系统所设置的常规的角度测量工具进行这种测量。

[0171] 使用者可以利用输入装置将所测量到的数值输入中央处理单元中,以便指示纤维3的空间特性。

[0172] 在本发明的第三个实施例中,初始物理参数是剪切波传播参数,如下所述,还可以自动地进行空间表征步骤b)。

[0173] 在该实施例中,初始超声采集步骤a)可有利地包括与多个剪切波方向相关以及与各向异性介质观测场中至少一个感兴趣区域中所采集到的多个初始物理参数相关的多个剪切波成像步骤。

[0174] 更准确地说,基本按照前文结合剪切波成像步骤c)所述的内容,执行每个剪切波成像步骤。因此,每个剪切波成像步骤首先包括激发子步骤a1),在所述激发子步骤过程中,

按照多个剪切波方向中的一个相关剪切波方向在各向异性介质内产生剪切波。因此,产生具有不同剪切波方向的多个剪切波。

[0175] 每个剪切波成像步骤都进一步包括观察子步骤a2),在所述观察子步骤过程中,在观测场的多个点上同时观察剪切波的传播,以便采集相关的初始物理参数,有利的是,在该实施例中,所述初始物理参数为剪切波传播参数。

[0176] 在该初始超声采集步骤a)之后,空间表征步骤b)包括将所采集到的剪切波传播参数一起作比较,从而确定各向异性介质中的首选的激发空间方向。

[0177] 例如,在所采集到的剪切波传播参数是剪切波速度的情况下,在多个采集到的剪切波速度之中,所采集到的剪切波速度的最高值可有利地与激发剪切波方向相关,所述激发剪切波方向在初始超声采集步骤a)过程中采用的多个激发剪切波方向之中与各向异性特征3对齐最佳。因此,就有可能确定各向异性介质2中的首选的激发空间方向。

[0178] 步骤a)和b)还可以针对两个或多个兴趣点以及两个或多个感兴趣区域执行。例如,在各向异性介质的观测场呈现出具有不同空间特性的多个区域的情况下,这可能是有利的。例如,观测场的第一个区域可包含沿着第一个方向定向的纤维,而观测场的第二个区域可包含沿着第二个方向定向的血管。

[0179] 在这种情况下,因此有利于限定第一个和第二个不同的感兴趣区域,所述感兴趣区域分别包括在观测场的第一个区域和第二个区域内。

[0180] 在步骤b)过程中所确定的各向异性介质的一组空间特性可包括与第一个感兴趣区域相关的第一组空间特性以及与第二个感兴趣区域相关的第二组空间特性。

[0181] 根据各向异性介质2可以确定两个以上感兴趣区域。

[0182] 在已经确定一组空间特性的情况下,如上文结合子步骤c1)所详细说明了,装置1的控制系统6、9可以通过改变聚焦超声波13的焦点13a的位置以及发射聚焦超声波13的时序来产生适合各向异性介质2空间特性的剪切波14。

[0183] 尤其是,装置1的控制系统6、9可以产生剪切波,其传播方向基本与各向异性特征3的空间扩展方向3a相一致。

[0184] 装置1的控制系统6、9还可以产生剪切波,其剪切波的波前基本垂直于各向异性特征3的空间扩展方向3a。

[0185] 在限定两个以上感兴趣区域的情况下,剪切波的空间特性,尤其是剪切波传播方向,可适合各个感兴趣区域。因此,可以产生具有至少两个传播方向的剪切波。例如,这种剪切波是球面波,尤其是因此可以不是平面波,而是复合波。

[0186] 作为选择,可发射多个剪切波,根据与感兴趣区域相关的空间特性来分别产生所述剪切波。

[0187] 还可以重复空间表征步骤b)和剪切波成像步骤c),以便进一步提取这组空间特性。

[0188] 可以将第n次迭代的步骤c)中所获得的图像,例如,通过映射子步骤c4)所确定的传播参数映射在第n+1次迭代中,用作步骤b)的初始物理参数。

[0189] 应该注意的是,本发明的方法可进一步包括跟踪各向异性介质2(尤其是各向异性特征3)的变形和位移的跟踪步骤或子步骤,以便在各向异性介质2中的相同位置进行超声参数的测量。

[0190] 此外,上文所述的剪切波成像可以与由相同装置实时提供的常规的超声成像相结合。

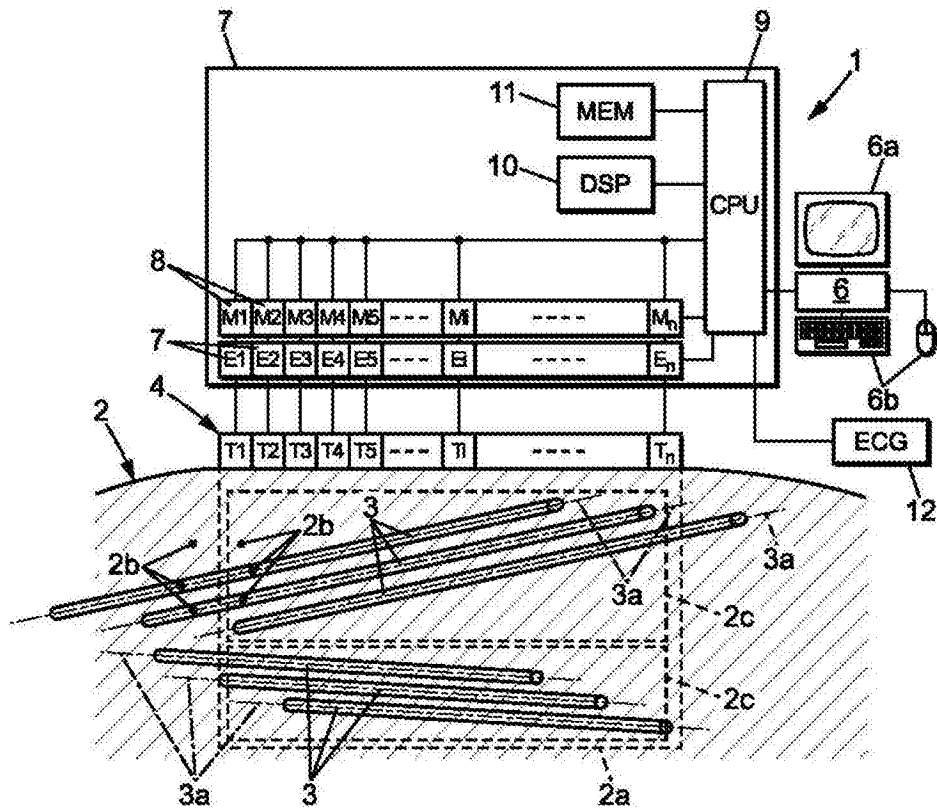


图1

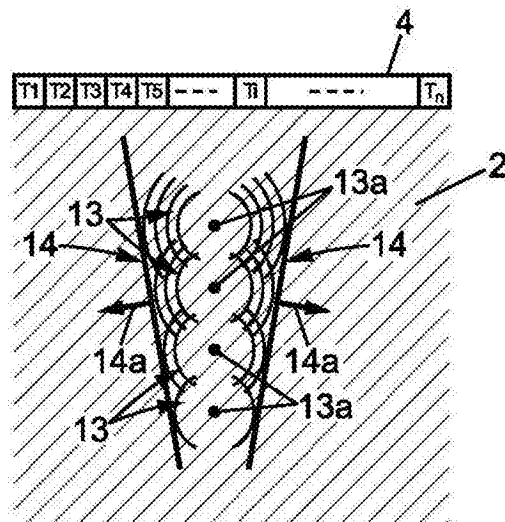


图2a

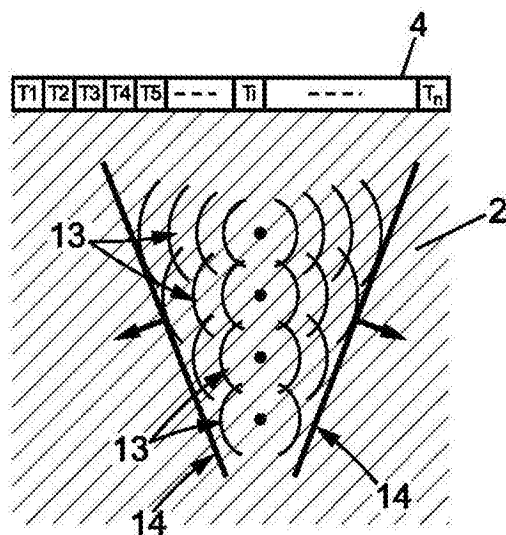


图2b

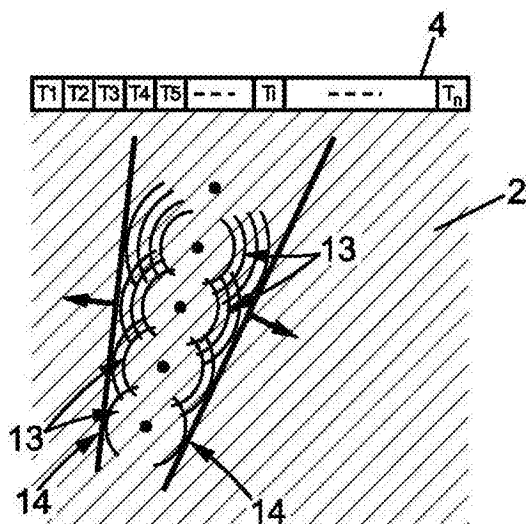


图2c

专利名称(译)	适用于各向异性介质成像的剪切波弹性成像方法及装置		
公开(公告)号	CN107405133A	公开(公告)日	2017-11-28
申请号	CN201480084350.9	申请日	2014-12-24
[标]申请(专利权)人(译)	超声成像公司		
申请(专利权)人(译)	超声成像		
当前申请(专利权)人(译)	超声成像		
[标]发明人	杰雷米勃可夫 金皮埃尔亨利		
发明人	杰雷米·勃可夫 金·皮埃尔·亨利		
IPC分类号	A61B8/08		
CPC分类号	A61B8/085 A61B8/485 A61B8/5207 G01S7/52022 G01S7/52042 G01S15/8915 A61B8/463 G01S15/8918		
代理人(译)	张彪		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

适用于各向异性介质(2)中的观测场(2a)成像的剪切波弹性成像方法，包括：初始超声采集步骤，在该步骤过程中，在至少一个感兴趣区域(2c)中采集初始物理参数；空间表征步骤，在该步骤过程中，根据初始物理参数来确定各向异性介质(2)的一组空间特性；激发子步骤，在该子步骤过程中，根据所述一组空间特性在各向异性介质(2)内产生剪切波；以及观察子步骤，在该子步骤过程中，在观测场(2c)的若干点上同时观察所述剪切波的传播。

