



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117053676 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 14

(21) 申请号 202310536498.2

(22) 申请日 2023.05.12

(30) 优先权数据

22173231.6 2022.05.13 EP

(71) 申请人 奥普托斯股份有限公司

地址 英国丹弗姆林

(72) 发明人 米格尔·安吉尔·普雷西亚多

(74) 专利代理机构 北京安信方达知识产权代理

有限公司 11262

专利代理师 陆建萍 杨明钊

(51) Int. Cl.

G01B 9/02 (2022.01)

G01B 9/02015 (2022.01)

G01J 3/28 (2006.01)

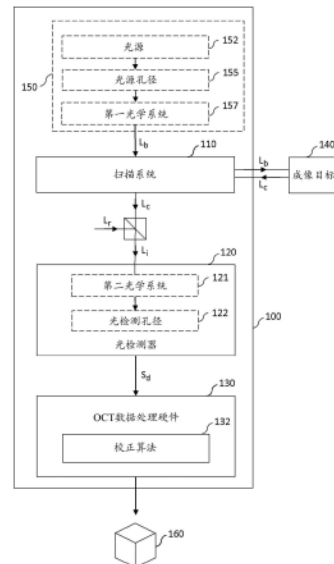
权利要求书3页 说明书14页 附图6页

(54) 发明名称

非共焦点扫描傅里叶域光学相干层析成像系统

(57) 摘要

一种非共焦点扫描傅立叶域光学相干层析 OCT 成像系统包括:扫描系统,该扫描系统被布置成在成像目标上执行光束的二维点扫描,并收集由成像目标散射的光;光检测器,该光检测器被布置成基于参考光与由扫描系统收集的光之间的干涉来生成检测信号。OCT 成像系统还包括硬件,该硬件被布置成:基于检测信号生成成像目标的复数体积 OCT 数据,该 OCT 数据包括分量,当该 OCT 数据被处理以生成 OCT 数据的 enface 投影时,该分量在 enface 投影中提供散焦和/或失真;以及通过执行校正算法来生成经校正的 OCT 数据,该校正算法使用 OCT 数据中的相位信息来从 OCT 数据中移除至少一些分量。



1. 一种非共焦点扫描傅立叶域光学相干层析OCT成像系统(100;300;400),包括:
扫描系统(110),所述扫描系统(110)被布置成在成像目标(140)上执行光束(L_b)的二维点扫描,并收集由所述成像目标(140)在所述点扫描期间散射的光(L_c);
光检测器(120;120'),所述光检测器(120;120')被布置成基于干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$)生成检测信号($S_d;S'_d$),所述干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$)通过参考光(L_r)与由所述扫描系统(110)在所述点扫描期间收集的光(L_c)之间的干涉产生;以及
OCT数据处理硬件(130),所述OCT数据处理硬件(130)被布置成:
基于所述检测信号(S_d)生成所述成像目标(140)的复数体积OCT数据,其中,所述复数体积OCT数据在被处理以生成所述复数体积OCT数据的enface投影时,提供在其中具有散焦或失真中的至少一种的enface投影;以及
通过执行校正算法来生成经校正的复数体积OCT数据,所述校正算法使用编码在所述复数体积OCT数据中的相位信息来校正所述复数体积OCT数据,使得所述经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成所述经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比所述复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。
2. 根据权利要求1所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),还包括:
光束发生器(150;150'),所述光束发生器(150;150')包括光源(152)、光源孔径(155)和第一光学系统(157),所述光源(152;152-1;152-2)被布置成经由所述光源孔径(155;155-2)通过所述第一光学系统(157)发射光以生成所述光束(L_b),
其中,所述光检测器(120;120')包括检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)和第二光学系统(121),所述光检测器(120;120')被布置成检测经由所述第二光学系统(121)传播通过所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)的所述干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$),并且
其中,被归一化到所述第二光学系统(121)的焦距的所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)的尺寸大于被归一化到所述第一光学系统(157)的焦距的所述光源孔径(155;155-2)的尺寸。
3. 根据权利要求2所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),其中,所述光源孔径(155;155-2)由第一光纤(154-2)的纤芯的端部提供,并且所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)由第二光纤(125-1、125-2;125-3)的纤芯的端部提供。
4. 根据权利要求3所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),其中,所述第一光纤(154-2)是单模光纤。
5. 根据权利要求3或权利要求4所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),其中,所述第二光纤(125-1、125-2;125-3)是多模光纤。
6. 根据任一前述权利要求所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),其中,所述扫描系统(110)包括扫描元件(112、114)和曲面镜(113、115),其中所述扫描系统(110)被布置成通过所述扫描元件经由所述曲面镜(113、115)在所述成像目标(140)上扫描所述光束(L_b)来执行所述二维点扫描。
7. 根据权利要求6所述的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400),其中,所述曲面镜(115)包括椭球面镜。
8. 根据任一前述权利要求所述的非共焦点扫描傅里叶域OCT成像系统(100;300;400),

其是非共焦点扫描扫频源OCT成像系统(300)和非共焦点扫描光谱域OCT成像系统(400)中的一种。

9.一种处理由非共焦点扫描傅立叶域光学相干层析OCT成像系统(100;300;400)生成的成像目标(140)的复数体积OCT数据的计算机实现的方法,所述非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400)包括:

扫描系统(110),所述扫描系统(110)被布置成在所述成像目标(140)上执行光束(L_b)的二维点扫描,并收集由所述成像目标(140)在所述点扫描期间散射的光(L_c);

光检测器(120;120'),所述光检测器(120;120')被布置成基于干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$)生成检测信号($S_d;S'_d$),所述干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$)通过参考光(L_r)与由所述扫描系统(110)在所述点扫描期间收集的光(L_c)之间的干涉产生;以及

OCT数据处理硬件(130),所述OCT数据处理硬件(130)被布置成基于所述检测信号(S_d)生成所述复数体积OCT数据,其中,所述复数体积OCT数据在被处理以生成所述复数体积OCT数据的enface投影时,提供在其中具有散焦或失真中的至少一种的enface投影,

所述方法包括:

从所述OCT数据处理硬件(130)获取(S10)所述成像目标(140)的所述复数体积OCT数据;以及

通过执行校正算法来生成(S20)经校正的复数体积OCT数据,所述校正算法使用编码在所述复数体积OCT数据中的相位信息来校正所述复数体积OCT数据,使得所述经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成所述经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比所述复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

10.根据权利要求9所述的计算机实现的方法,其中,所述非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统(100;300;400)还包括:

光束发生器(150;150'),所述光束发生器(150;150')包括光源(152)、光源孔径(155)和第一光学系统,所述光源(152;152-1;152-2)被布置成经由所述光源孔径(155;155-2)通过所述光学系统发射光以生成所述光束(L_b),

其中,所述光检测器(120;120')包括检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)和第二光学系统,所述光检测器(120;120')被布置成检测经由所述第二光学系统传播通过所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)的所述干涉光($L_i;L_{i1},L_{i2}$),并且

其中,被归一化到所述第二光学系统的焦距的所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)的尺寸大于被归一化到所述第一光学系统的焦距的所述光源孔径(155;155-2)的尺寸。

11.根据权利要求10所述的计算机实现的方法,其中,所述光源孔径(155;155-2)由第一光纤(154-2)的纤芯的端部提供,并且所述检测孔径(122;122-1、122-2;122-3)由第二光纤(125-1、125-2;125-3)的纤芯的端部提供。

12.根据权利要求11所述的计算机实现的方法,其中,所述第一光纤(154-2)是单模光纤。

13.根据权利要求11或权利要求12所述的计算机实现的方法,其中,所述第二光纤(125-1、125-2;125-3)是多模光纤。

14.根据权利要求9至13中任一项所述的计算机实现的方法,其中,所述扫描系统(110)

包括扫描元件(112、114)和曲面镜(113、115),其中,所述扫描系统(110)被布置成通过所述扫描元件经由所述曲面镜(113、115)在所述成像目标(140)上扫描所述光束(L_b)来执行所述二维点扫描。

15.一种包括计算机可读指令的计算机程序,所述计算机可读指令在由处理器执行时,使所述处理器执行根据权利要求9至14中至少一项所述的方法。

非共焦点扫描傅里叶域光学相干层析成像系统

[0001] 领域

[0002] 本文的示例方面总体上涉及傅立叶域光学相干层析 (OCT) 系统的领域, 并且特别地, 涉及点扫描傅立叶域OCT系统。

[0003] 背景

[0004] 光学相干层析 (OCT) 是一种基于低相干干涉测量的成像技术, 其被广泛用于获取诸如生物组织的光学散射介质的高分辨率的二维图像和三维图像。

[0005] 众所周知, 根据如何实现深度测距, OCT成像系统可以被分类为时域OCT (TD-OCT) 或傅立叶域OCT (FD-OCT) (也称为频域OCT)。在TD-OCT中, 成像系统的干涉仪的参考臂的光路长度在获取由OCT成像系统成像的散射介质 (本文中称为“成像目标”) 的反射率分布 (reflectivity profile) 期间随时间变化, 反射率分布通常被称为“深度扫描”或“轴向扫描” (“A扫描”)。在FD-OCT中, 由于干涉仪的参考臂和样品臂之间在每个A扫描位置处的干涉产生的光谱干涉图被傅立叶变换, 以同时获取沿着A扫描的深度的所有点, 而不需要参考臂的光路长度的任何变化。FD-OCT可以允许比干涉仪中的样品臂镜的扫描快得多的成像, 因为来自样品的所有背反射都是同时测量的。两种常见的FD-OCT类型是光谱域OCT (SD-OCT) 和扫频源OCT (SS-OCT)。在SD-OCT中, 宽带光源向成像目标传递许多波长, 并且使用光谱仪作为检测器来同时测量所有波长。在SS-OCT (也称为时间编码的频域OCT) 中, 光源扫过一个波长范围, 并且检测器的时间输出被转换为光谱干涉。

[0006] OCT成像系统也可以被分类为点扫描 (也称为“点检测”或“扫描点”)、线扫描或全场, 这取决于成像系统如何被配置成横向获取OCT数据。点扫描OCT成像系统通过以下方式获取OCT数据: 在成像目标的表面上扫描聚焦的样品光束, 通常沿着成像目标表面上的单条线 (例如, 可以是直的, 或者替代地是弯曲的以限定圆形或螺旋形) 或一组 (通常基本平行的) 线进行扫描, 并获取沿着线的多个点中的每一个的轴向深度分布 (A扫描), 一次一个点, 以建立OCT数据, 该OCT数据包括表示样品的二维或三维 (体积) 反射比分布的一维或二维A扫描阵列。

[0007] 点扫描OCT系统通常是共焦的, 这意味着在OCT系统的干涉光检测器之前的光路中存在共焦栅极 (confocal gate)。这防止了来自在OCT扫描仪的焦平面内但不在其焦点附近的点的光到达检测器, 从而提高了点扫描OCT系统的横向分辨率。点扫描OCT系统通常采用单模光纤来传送从OCT光源到成像目标的光和从成像目标到干涉光检测器的返回光, 其中单模光纤纤芯的端部有效地提供了点光源和共焦栅极。

[0008] 然而, 在具有引起显著的光学像差和/或散焦的光学部件的这种点扫描OCT成像系统 (例如, 在其扫描系统中具有椭球面镜或类似部件而不是透镜的基于反射镜的OCT系统) 中, 到达共焦栅极的平面处的返回光的强度的显著比例可能分布在共焦栅极外部。这导致检测中的信噪比 (SNR) 降低, 从而降低了检测灵敏度并因此降低了OCT成像系统的成像质量。类似的问题可能是由源于成像目标而不是源于OCT成像系统本身的像差/散焦引起。例如, 在眼科应用中, 其中共焦点扫描OCT成像系统被广泛用于对眼睛的视网膜成像, 对成像光的波前的与扫描位置有关的和特定于患者的像差可能限制OCT成像系统的灵敏度, 这些

像差由眼睛的光学元件(主要是角膜和晶状体)的曲率的变化和可能的缺陷引起。在这些应用中,当对视网膜周边成像时,像差往往具有更大的影响,因此也对OCT成像系统的在其上可以获得可接受的图像质量的视野提供了限制因素。迄今为止,解决该问题的努力涉及开发自适应光学(AO)技术(包括基于波前传感器的AO校正方法中的硬件,以及在没有波前传感器方法中使用的算法),以允许更有效地补偿或校正像差等。

[0009] 概述

[0010] 根据本文的第一示例方面,提供了一种非共焦点扫描傅立叶域光学相干层析(FD-OCT)成像系统,该成像系统包括扫描系统和光检测器,扫描系统被布置成在成像目标上执行光束的二维点扫描,并收集由成像目标在点扫描期间散射的光,光检测器被布置成基于干涉光来生成检测信号,该干涉光通过参考光与由扫描系统在点扫描期间收集的光之间的干涉产生。FD-OCT成像系统还包括OCT数据处理硬件,该OCT数据处理硬件被布置成:基于检测信号生成成像目标的复数体积OCT数据,其中该复数体积OCT数据在被处理以生成该复数体积OCT数据的enface投影(enface projection)时,提供在其中具有散焦或失真中的至少一种的enface投影;以及通过执行校正算法来生成经校正的复数体积OCT数据,该校正算法使用编码在复数体积OCT数据中并且可以具有一定程度的相位稳定性的相位信息来校正复数体积OCT数据,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0011] 根据本文的第二示例方面,提供了一种处理由非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统生成的成像目标的复数体积OCT数据的计算机实现的方法。非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统包括:扫描系统,该扫描系统被布置成在成像目标上执行光束的二维点扫描,并收集由成像目标在点扫描期间散射的光;光检测器,该光检测器被布置成基于干涉光来生成检测信号,该干涉光通过参考光与由扫描系统在点扫描期间收集的光之间的干涉产生;以及OCT数据处理硬件,该OCT数据处理硬件被布置成基于检测信号生成复数体积OCT数据,其中,该复数体积OCT数据在被处理以生成复数体积OCT数据的enface投影时,提供在其中具有散焦或失真中的至少一种的enface投影。该方法包括从OCT数据处理硬件获取成像目标的复数体积OCT数据,以及通过执行校正算法来生成经校正的复数体积OCT数据,该校正算法使用编码在复数体积OCT数据中并且可以具有一定程度的相位稳定性的相位信息来校正复数体积OCT数据,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0012] 在上述计算机实现的方法的示例中,复数体积OCT数据可以包括作为相位信息的相位分量,该相位分量在复数体积OCT数据的至少一部分上的变化包括由成像目标的结构定义的第一分量和与成像目标的结构无关的第二分量,并且经校正的复数体积OCT数据可以通过执行校正算法来生成,该校正算法使用相位分量来校正复数体积OCT数据,其中在复数体积OCT数据的所述至少一部分上的相位分量变化中,第一分量比第二分量占优势,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。附加地或替代地,对应于成像目标140上的每个扫描位置的复数体积OCT数据

的相位信息的相应项可以在点的相应询问时间(即,在点扫描期间由扫描系统110收集从扫描位置散射的光的持续时间)期间具有相位稳定性,这允许校正算法132校正复数体积OCT数据,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0013] 根据本文的第三示例方面,还提供了包括计算机可读指令的计算机程序,该计算机可读指令在由处理器执行时,使处理器执行本文的第二示例方面或上面阐述的其示例的方法。计算机程序可以存储在非暂时性计算机可读存储介质(例如,诸如计算机硬盘或CD)上,或者可以由计算机可读信号携带。

[0014] 在上面阐述的非共焦点扫描FD-OCT成像系统中,复数体积OCT数据可包括作为相位信息的相位分量,该相位分量在复数体积OCT数据的至少一部分上的变化包括由成像目标的结构定义的第一分量和与成像目标的结构无关的第二分量。OCT数据处理硬件可被布置成通过执行校正算法来生成经校正的复数体积OCT数据,该校正算法使用相位分量来校正复数体积OCT数据,其中,在复数体积OCT数据的所述至少一部分上的相位分量变化中,第一分量比第二分量占优势,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。附加地或替代地,对应于成像目标140上的每个扫描位置的复数体积OCT数据的相位信息的相应项可以在点的相应询问时间(即,在点扫描期间由扫描系统110收集从扫描位置散射的光的持续时间)期间具有相位稳定性,这允许校正算法132校正复数体积OCT数据,使得经校正的复数体积OCT数据在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0015] 非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统可以是眼科非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统,其中成像目标是患者的眼睛。在这种情况下,扫描系统可以被布置成在眼睛的一部分上执行光束的二维点扫描,使得在点扫描的时间尺度上,眼睛相对于眼科非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统是静止的,在该时间尺度期间,扫描系统在眼睛的该一部分上执行光束的二维点扫描。

[0016] 非共焦点扫描FD-OCT成像系统还可以包括光束发生器,该光束发生器包括光源、光源孔径(aperture)和第一光学系统,该光源被布置成经由光源孔径通过第一光学系统发射光以生成光束,其中光检测器包括检测孔径和第二光学系统,该光检测器被布置成检测经由第二光学系统传播通过检测孔径的干涉光,其中被归一化到第二光学系统的焦距的检测孔径的尺寸大于被归一化到第一光学系统的焦距的光源孔径的尺寸。光源孔径可以由第一光纤的纤芯的端部提供,并且检测孔径可以由第二光纤的纤芯的端部提供。第一光纤可以是单模光纤,并且第二光纤可以是多模光纤。

[0017] 在上面所阐述的非共焦点扫描FD-OCT成像系统中,扫描系统可以包括至少一个扫描元件和至少一个曲面镜。扫描系统可以被布置成通过该至少一个扫描元件经由该至少一个曲面镜在成像目标上扫描光束来执行二维点扫描。该至少一个曲面镜可以包括椭球面镜。

[0018] 例如,非共焦点扫描FD-OCT成像系统可以是非共焦点扫描光谱域OCT成像系统或

者非共焦点扫描扫频源OCT成像系统。

[0019] 附图简述

[0020] 现在将仅通过非限制性示例的方式参考下面描述的附图来详细解释示例实施例。除非另有指示,否则在附图中的不同附图中出现的相似的附图标记可以表示相同的元素或在功能上相似的元素。

[0021] 图1是根据本文的示例实施例的非共焦点扫描傅立叶域OCT成像系统的示意图。

[0022] 图2是可编程信号处理硬件的示意图,其可以被配置为执行本文描述的OCT数据处理硬件的功能。

[0023] 图3是示出根据示例实施例的生成经校正的复数体积(complex volumetric)OCT数据的过程的流程图。

[0024] 图4是根据本文的第一示例实施例的非共焦点扫描扫频源OCT成像系统的示意图。

[0025] 图5是包括在示例实施例中的示例扫描系统的示意图。

[0026] 图6是根据本文的第二示例实施例的非共焦点扫描光谱域OCT成像系统的示意图。

[0027] 示例实施例的详细描述

[0028] 鉴于上面讨论的传统点扫描OCT成像系统的缺点,本申请发明人已经认识到,傅立叶域点扫描OCT成像系统的检测灵敏度可以通过背离使这些系统共焦的既定实践来提高,共焦通常是经由通过与最初发射的用于照射成像目标的光相同的孔径来收集由成像目标散射的光来实现,在许多常见的实现中,该孔径是光纤纤芯的端部。此外,发明人已经认识到,通过使点扫描FD-OCT成像系统非共焦,使得来自成像目标的返回光的分量(其在共焦点扫描FD-OCT成像系统中会被共焦栅极阻挡)能够对在非共焦点扫描FD-OCT成像系统中检测到的干涉光做出贡献,可以实现检测灵敏度的改进(或改进的SNR)。例如,在非共焦点扫描FD-OCT成像系统的基于光纤的实现中,可以通过使端部提供检测孔径的光纤的直径大于端部提供源孔径(成像目标经由该源孔径被照射)的另一光纤的直径来实现非共焦。具有显著散焦和像差(这将由这种系统中的共焦性损失导致)的OCT成像系统的横向分辨率的劣化迄今为止已经使得非共焦点扫描FD-OCT成像系统成为不吸引人的提议,并且检测灵敏度的问题先前已经通过使共焦OCT成像系统包括自适应光学硬件来解决,该自适应光学硬件补偿成像系统的光学器件和/或成像目标中的像差,例如PCT申请号PCT/GB2013/052556(其被公开为W0 2014/053824 A1)中所提出的。

[0029] 然而,发明人还发现,已经开发的用于重新聚焦来自共焦点扫描FD-OCT成像系统的图像(例如,enface投影或B扫描)以去除这些系统中通常出现的小程度的散焦的数字聚焦技术可以被应用来有效地减轻在来自非共焦点扫描FD-OCT成像系统的图像中可能观察到的更广泛的散焦,该非共焦点扫描FD-OCT成像系统没有很好地聚焦和/或具有显著的像差,并且因此减少或防止在这种系统中原本会出现的横向分辨率的损失。发明人已经发现这种数字聚焦技术可以应用于非共焦点扫描FD-OCT成像系统,尽管共焦性损失引入了某些复杂性,这使得这一发现令人惊讶。更具体地,在共焦点扫描FD-OCT成像系统的情况下,可以证明,在成像目标上的位置进行OCT测量等同于使用在该位置具有二次空间变化的相位项进行卷积,该卷积可以通过使用数值重新聚焦来补偿。然而,在非共焦点扫描FD-OCT成像系统的情况下,这种相位项的适用性初步看来是不清楚的,因为由缺少共焦栅极所允许的多重干涉预期可能会破坏性地增加。发明人已经发现情况并非如此,并且先前已经开发的

用于重新聚焦来自共焦点扫描FD-OCT成像系统的图像的已知数字聚焦技术可以被应用来有效地重新聚焦来自非共焦点扫描FD-OCT成像系统的图像。

[0030] 第一示例实施例

[0031] 图1是根据本文的示例实施例的一种非共焦点扫描FD-OCT成像系统100的示意图。FD-OCT成像系统100包括扫描系统110、光检测器120和OCT数据处理硬件130。如在该第一示例实施例中,非共焦点扫描FD-OCT系统100可以是非共焦点扫描扫频源OCT(SS-OCT)系统300,如图4中的第一示例实施例的更详细图示所示。然而,非共焦点扫描FD-OCT成像系统100不需要以这种形式提供,并且可以例如采取光谱域OCT(SD-OCT)系统400的替代形式,如下面参考图6所描述的第二示例实施例的实例中。更一般地,示例实施例可以被提供作为任何形式的非共焦点扫描FD-OCT成像系统,该成像系统能够生成复数体积OCT数据,即表示针对在二维点扫描期间进行OCT测量的每个扫描位置而获得的复数A扫描信息的各个光谱干涉图(干涉光谱)的傅立叶变换。这种复数体积OCT数据对来自所获取的OCT测量值的相位信息进行编码,该相位信息可以被如本文所述的校正算法用于数字地重新聚焦OCT图像数据。

[0032] 扫描系统110被布置成在成像目标140上执行光束 L_b 的二维点扫描,并收集在点扫描期间已经由成像目标140散射的光 L_c 。扫描系统110因此被布置成通过用光束 L_b 顺序地照射扫描位置(一次一个扫描位置),并收集由成像目标140在每个扫描位置散射的光 L_c 的至少一部分,来获取二维分布在成像目标140的表面上的各个扫描位置处的A扫描。扫描系统110可以使用本领域技术人员已知的任何合适的扫描模式来执行二维点扫描,例如单向扫描(其中接下来是在公共方向上的一组平行扫描线,这些平行扫描线沿着该公共方向延伸)、蛇形扫描或螺旋扫描。

[0033] 在本示例实施例中,FD-OCT成像系统100是眼科FD-OCT成像系统,其被布置成从眼睛视网膜区域形式的成像目标140获取OCT数据,但是可以通过OCT被成像的眼睛的任何其他部位(诸如眼睛的前段(anterior segment)的一部分)可以替代地或附加地形成成像目标140。扫描系统110可以被布置成在眼睛的一部分上执行光束 L_b 的二维点扫描,使得眼睛在点扫描的时间尺度上相对于眼科FD-OCT成像系统是静止的,在该时间尺度期间,扫描系统110在眼睛的该部分上执行光束 L_b 的二维点扫描。然而,成像目标140不限于眼睛的一部分,并且可以替代地是任何组织(例如皮肤)、生物样品,或者更一般地,其次表面结构要通过OCT被成像的任何散射介质。

[0034] FD-OCT成像系统100还可以包括光束发生器150,光束发生器150包括光源152、光源孔径155和第一光学系统157。在这种情况下,光源152被布置成经由光源孔径155通过第一光学系统157发射光,以生成光束 L_b ,使得光源孔径155的形状和尺寸(例如,在光源孔径155为圆形的情况下的直径)限定光束 L_b 的横截面形状和尺寸(例如直径)(即,使得这些尺寸和形状是相同的)。在一些示例实施例中,光束发生器150可以包括其他部件(图1中未示出),例如,诸如用于准直来自光源152的光的一个或更多个准直透镜。

[0035] 光检测器120被布置成基于干涉光 L_i 生成检测信号 S_d ,该干涉光 L_i 由参考光 L_r 与由扫描系统110在点扫描期间收集的光 L_c 之间的干涉产生。换言之,参考光和由扫描系统在点扫描期间收集的光被引导以彼此重合和干涉,并且所产生的干涉光 L_i 经由光检测器120的第二光学系统121和光检测孔径122被引导到光检测器120的光检测部件(未示出)并被该光

检测部件接收。因此,光检测器120能够检测经由第二光学系统121传播通过检测孔径122的干涉光 L_1 。被归一化到第二光学系统121的焦距的检测孔径122的尺寸(例如直径)大于被归一化到第一光学系统157的焦距的光源孔径155的尺寸(例如直径)。换言之,检测孔径122的尺寸与第二光学系统121的焦距之比大于光源孔径155的尺寸与第一光学系统157的焦距之比。本文的孔径尺寸指的是在垂直于光传播通过孔径的方向的平面上的投影区域。光检测器120通过对接收到的干涉光 L_1 进行光电转换来生成检测信号 S_d 。光检测器120可以采取的具体形式将取决于非共焦点扫描FD-OCT成像系统100的实现形式。例如,在FD-OCT成像系统100被实现为SD-OCT成像系统的情况下,光检测器120包括光谱仪,光谱仪可以具有衍射光栅、傅立叶变换透镜和检测器阵列(或行扫描相机)。在FD-OCT成像系统100被实现为SS-OCT成像系统的情况下,如在本示例实施例中,光检测器120可包括平衡式光电检测器装置,该平衡式光电检测器装置包括两个光电检测器(例如,反向偏置的光电二极管),这两个光电检测器的输出光电流彼此相减,其中,相减后的电流信号通过跨阻(transimpedance)放大器被转换成电压检测信号。检测信号 S_d 然后由OCT数据处理硬件130处理。

[0036] OCT数据处理硬件130被布置成使用众所周知的数据处理技术来基于检测信号 S_d 生成成像目标140的复数体积OCT数据。该复数体积OCT数据在被处理以(使用任何已知的投影技术,诸如求和体素投影(summed-voxel projection, SVP)或将SVP限制到被成像的样品的选定平板(slab)的受限SVP(RSVP))生成复数体积OCT数据的enface投影时,提供在enface投影图像中具有散焦(模糊)和/或失真的enface投影。换句话说,OCT数据包括这样的分量(例如,如下面所讨论的相位误差),即当OCT数据(或仅其子集)被处理以(使用如上所述的任何众所周知的投影技术)生成OCT数据的enface投影时,该分量在enface投影图像中提供散焦(模糊)和/或失真。enface投影(或图像形式的OCT数据的其他表示,例如B扫描图像)中的散焦和/或失真可能源于FD-OCT成像系统100内的一些光学器件中的像差,例如可以设置在扫描系统110中的一个或多个曲面镜中的像差。替代地或附加地,散焦和/或失真可能由成像目标中的光学缺陷引起。由于传统的共焦点扫描FD-OCT成像系统中的共焦栅极的影响,enface投影图像中的这种散焦和/或失真在由这种成像系统生成的OCT数据中不太明显,并且可以使用已知的数值重新聚焦算法来抑制,例如在《Biomedical Optic Express》第3卷第11期第2774-2783页G.Liu等人的题为“Digital focusing of OCT images based on scalar diffraction theory and information entropy”的文章中所公开的,该文章的内容在此通过引用以其整体并入。

[0037] OCT数据处理硬件130还被布置成通过执行校正算法132来生成经校正的复数体积OCT数据160,该校正算法132处理编码在复数体积OCT数据中并且具有一定程度的相位稳定性的相位信息来校正复数体积OCT数据,使得经校正的复数体积OCT数据160在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据160的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的散焦和/或更少的失真(即,更小程度(幅度)的散焦和/或失真)的enface投影。换句话说,OCT数据处理硬件130还被布置成通过执行校正算法132来生成经校正的复数体积OCT数据160,该校正算法132处理编码在复数体积OCT数据中的相位信息,以从复数体积OCT数据中移除或减少至少一些前述分量(即,存在于enface投影中的散焦和/或失真的源,该源位于复数体积OCT数据中)。在FD-OCT中,对相位信息进行编码的复数数据可以从由FD-OCT成像系统测量的干涉的光谱的离散傅立叶变换(DFT)中获得。

[0038] 复数体积OCT数据可以包括作为相位信息的相位分量,该相位分量在复数体积OCT数据的至少一部分上的变化包括由成像目标140的结构定义的第一分量和与成像目标140的结构无关的剩余的第二个分量。所描述的OCT数据处理硬件130(其将在下面被更详细地描述)可以被布置成通过执行校正算法132来生成经校正的复数体积OCT数据,该校正算法132使用相位分量来校正复数体积OCT数据,其中,在复数体积OCT数据的所述至少一部分上的相位分量的变化中,第一个分量比第二个分量占优势,使得经校正的复数体积OCT数据160在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据160的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0039] 因此,OCT数据处理硬件130将复数体积OCT数据作为校正算法132的输入,校正算法132被运行以生成和输出经校正的复数体积OCT数据160,使得经校正的复数体积OCT数据160的enface投影相比输入的复数体积OCT数据的enface投影具有更少的散焦和/或失真。因此,经校正的复数体积OCT数据160使至少一些上述分量(源)从复数体积OCT数据中被移除或减少。结果,经校正的OCT数据160的enface投影表现出:散焦的减少和/或像差引起的失真的减少,以及因此相对于用作校正算法132的输入的复数体积OCT数据的enface投影的提高了的横向分辨率。enface投影图像中的聚焦(散焦)程度可以使用本领域技术人员已知的许多不同方式中的任何一种来量化。作为示例,可以使用基于梯度的聚焦测量算子、基于拉普拉斯算子(Laplacian)的聚焦测量算子、基于小波的聚焦测量算子、基于统计的聚焦测量算子或基于离散余弦变换的聚焦测量算子来量化散焦程度。在S.Pertuz等人发表于《Pattern Recognition》第46卷(2013年)第1415-1432页的题为“Analysis of focus measure operators from shape-from-focus”的文章中提供了这种聚焦测量算子的各种示例,该文章的全部内容通过引用在此并入。

[0040] 校正算法132可以是本领域中已知的任何数值重新聚焦和/或像差校正算法,其能够通过利用体积OCT数据中的复数场信息来提高经校正的体积OCT数据160的enface投影中的横向分辨率。通常,校正算法132在对结果进行傅立叶逆变换之前,对傅立叶域中的复数体积OCT数据应用相位滤波器。选择相位滤波器以减少或移除会在复数体积OCT数据的enface投影中产生散焦/失真的相位误差。可以从FD-OCT成像系统的数学模型中推导出合适的相位滤波器。

[0041] 作为示例,校正算法132可以采取全自动像差校正算法的形式,如《Nature Photonics》第9卷(2015年):第440-443页的N.D.Shemonski等人在题为“Computational high-resolution optical imaging of the living human retina”的文章中所描述的全自动像差校正算法,该文章的全部内容(包括其中的补充章节)通过引用在此并入。在所描述的像差校正算法中,在应用傅立叶逆变换之前,将复数体积OCT数据的傅立叶变换乘以相位滤波器。该相位滤波器在计算上模拟Shack-Hartmann波前传感器的功能,但是它也可以适于包括散焦校正,如N.D.Shemonski等人在前述文章中所解释的。峰值检测度量可以与基于导引星(guide-star)的算法结合应用,以迭代地对像差校正进行微调。

[0042] 作为另一个示例,校正算法132可以采取在《Biomed.Opt.Express》第3卷第2774-2783页(2012年)G.Liu等人的“Digital focusing of OCT images based on scalar diffraction theory and information entropy”中的数字重新聚焦方法的形式,该文章的全部内容通过引用在此并入。所描述的数字重新聚焦方法包括对复数体积OCT数据进行

傅立叶变换,并将其重新缩放到线性k空间中。然后,在轴向方向上对该数据进行重新采样,以获得沿轴向方向的一系列enface帧。然后,通过执行搜索以获得使图像的熵函数最小化的焦距(诸如,对应于在一系列不同焦距处重新聚焦的图像中具有最小香农熵的图像的距离),这些enface帧被数字地重新聚焦到新的焦平面上,因为熵函数随每个距离而变化。一旦所有enface帧已经沿着轴向方向重新聚焦,就将傅立叶逆变换应用于重新聚焦的enface帧,使得获得重新聚焦的图像域体积OCT数据。

[0043] 然而,应当注意,校正算法132不限于上面列出的示例。例如,校正算法132可以采取在《Biomed.Opt.Express》第8卷第1549-1574页(2017年)Y.Liu等人的“Computational optical coherence tomography[Invited]”中所公开和/或引用的计算像差校正算法、数字重新聚焦算法和干涉合成孔径显微技术算法中的一种的替代形式,该文章的全部内容通过引用在此并入。

[0044] 如Y.Liu等人在前述文章的第6节中所述,与成像目标140中的每个点相对应的复数体积OCT数据的相应相位信息需要在该点的相应询问时间(即,在点扫描期间通过扫描系统110收集由该点散射的光的持续时间)期间具有相位稳定性,这允许校正算法132校正复数体积OCT数据。必要的相位稳定性取决于校正算法132的实现,并且可以通过非共焦点扫描FD-OCT成像系统100的硬件的适当配置或者通过复数体积OCT成像数据的后处理(其可以是校正算法132的一部分)来实现,如下面所阐述的。进一步提高非共焦点扫描FD-OCT成像系统100的相位稳定性可以提高校正算法132在减少经校正的复数体积OCT数据160的enface投影中存在的散焦和/或失真方面的有效性。

[0045] 换句话说,在上面阐述的非共焦点扫描FD-OCT成像系统100中,复数体积OCT数据可以包括相位分量,该相位分量在复数体积OCT数据的至少一部分上的变化包括由成像目标140的结构(以及特别地,当光束扫描通过结构时,该结构散射入射光束的方式)定义的第一分量。相位分量的剩余变化与成像目标140的结构无关(使得相位分量由第一分量和与成像目标140的结构无关的剩余的第二分量组成)。OCT数据处理硬件130可以被布置成通过执行校正算法132来生成经校正的复数体积OCT数据160,该校正算法132使用相位分量来校正复数体积OCT数据,其中,第一分量在复数体积OCT数据的所述至少一部分上的相位分量变化中占优势(即,在复数体积OCT数据的所述至少一部分上的相位分量变化中,第一分量比第二分量占优势),使得经校正的复数体积OCT数据160在被处理以生成经校正的复数体积OCT数据160的enface投影时,提供相比复数体积OCT数据的enface投影具有更少的所述散焦或失真中的所述至少一种的enface投影。

[0046] 点扫描FD-OCT成像系统的相位稳定性的这种改进可以通过成像硬件的适当配置和/或后处理方法来实现,例如,如Y.Liu等人的文章中所描述的。例如,非共焦点扫描OCT成像系统100可以被配置成以足够高的速度成像以实现至少部分相位稳定性,例如使得二维点扫描的持续时间充分地小于非共焦点扫描FD-OCT成像系统100内的运动伪影的平均(或优选地最小)时间段(例如,小一个数量级或更多),该运动伪影诸如是由患者移动或由扫描系统100中的一个或多个元件中的抖动引起的运动伪影。例如,在非共焦点扫描FD-OCT成像系统100是眼科FD-OCT成像系统的情况下,其中,成像目标140是患者的眼睛并且扫描系统110被布置成在眼睛的一部分上执行光束的二维点扫描,眼睛可以在时间尺度上相对于眼科FD-OCT成像系统是静止的,扫描系统110在该时间尺度上执行二维点扫描。这可以通过扫

描系统110被布置成以例如大于或等于100kHz的扫描速度执行二维点扫描来实现。扫描速度可以由轴向深度扫描速率(A扫描速率或行速率)来表征。对于SS-OCT系统,扫描速度可以由扫描重复率给出,而对于SD-OCT,扫描速度可以由所应用的行扫描相机的行速率给出。

[0047] 其他演示的硬件方法包括OCT成像系统与其成像目标的耦合,在样品附近和在OCT图像内引入固定相位参考对象以提供用于轴向运动校正的参考点,以及使用附加的散斑跟踪成像子系统来校正横向运动,如Y.Liu等人的文章中进一步描述的。

[0048] 一种可能的后处理方法(其可以形成校正算法132的一部分)使用相邻快轴帧(即,平行二维点扫描中的B扫描)的复共轭乘法来确定帧之间的相位差,并因此校正沿着OCT成像系统的慢轴的轴向运动,如Y.Liu等人的文章中进一步描述的。使用后处理方法可以降低对OCT成像系统的成像速度要求,这些成像速度要求是获得类似相位稳定性所必需的。

[0049] 上面阐述的稳定性考虑因素在《Opt.Express》第22卷第19183-19197页(2014年)N.Shemonski等人的“Stability in computed optical interferometric tomography (Part I):Stability requirements”中被进一步详细说明,该文章的全部内容通过引用在此并入。

[0050] OCT数据处理硬件130可以以任何合适的形式提供,例如作为图2中示意性示出的那种可编程信号处理硬件200提供。可编程信号处理硬件200包括通信接口(I/F)210,用于从光检测器120接收检测信号 S_d ,并输出经校正的复数体积OCT数据160和/或其图形表示(例如,经校正的复数体积OCT数据160的enface投影的形式),以用于在诸如计算机屏幕等的显示器上显示。信号处理硬件200还包括处理器(例如,中央处理单元CPU和/或图形处理单元GPU)220、工作存储器230(例如,随机存取存储器)和存储计算机程序245的指令储存装置240,计算机程序245包括计算机可读指令,该计算机可读指令当由处理器220执行时使处理器220执行各种功能,包括本文描述的OCT数据处理硬件130的那些功能。工作存储器230存储由处理器220在执行计算机程序245期间所使用的信息。指令储存装置240可以包括预加载有计算机可读指令的ROM(例如,电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)或闪存的形式)。可替代地,指令储存装置240可以包括RAM或类似类型的存储器,并且计算机程序245的计算机可读指令可以从计算机程序产品(例如CD-ROM、DVDROM等形式的非暂时性计算机可读存储介质250)或者携带计算机可读指令的计算机可读信号260输入到指令储存装置240。在任何情况下,计算机程序245在由处理器220执行时,使处理器220执行本文所述的OCT数据处理硬件130的功能。换句话说,示例实施例的OCT数据处理硬件130可以包括计算机处理器220和存储计算机可读指令的存储器240,这些计算机可读指令在由计算机处理器220执行时,使计算机处理器220基于来自光检测器120的检测信号 S_d 生成成像目标的复数体积OCT数据,其中,该复数体积OCT数据在被处理以生成复数体积OCT数据的enface投影时,提供在enface投影中具有散焦或失真中的至少一种的enface投影。此外,计算机可读指令在由计算机处理器220执行时,使计算机处理器220执行校正算法132,以从OCT数据中移除至少一些分量,从而产生经校正的OCT数据160,如本文所述。

[0051] 然而,应当指出的是,OCT数据处理硬件130可以替代地在不可编程硬件(诸如ASIC、FPGA或者专用于执行上述OCT数据处理硬件130的功能的其他集成电路)中实现,或在这种不可编程硬件和如上面参考图2描述的可编程硬件的组合中实现。

[0052] 图3是示出过程(复数体积OCT数据校正算法)的流程图,通过该过程,示例实施例

的OCT数据处理硬件130通过执行校正算法132来生成经校正的复数体积OCT数据160,校正算法132处理编码在复数体积OCT数据中的相位信息以校正复数体积OCT数据。

[0053] 在图3的过程S10中,OCT数据处理硬件130获取先前已经通过成像目标140生成的成像目标140的复数体积OCT数据,例如通过从OCT数据处理硬件130的存储器(例如,图2中所示的工作存储器230)中检索该数据来获取。

[0054] 然后,在图3的过程S20中,OCT数据处理硬件130通过执行上述校正算法132,从而从复数体积OCT数据中移除至少一些分量来生成经校正的复数体积OCT数据160。

[0055] 图3的过程可以由以如以上参考图2所描述的可编程信号处理硬件200的形式实现的OCT数据处理硬件130来执行,该可编程信号处理硬件200在复数体积OCT数据校正计算机程序由一个或多个处理器执行时,根据包括在该计算机程序中的指令工作。该计算机程序可以存储在计算机程序产品(诸如CD-ROM、DVDROM等形式的非暂时性计算机可读存储介质)或携带计算机可读指令的计算机可读信号中。

[0056] 复数体积OCT数据校正计算机程序可以形成计算机程序的一部分,该计算机程序还基于检测信号 S_d 生成成像目标140的复数体积OCT数据,或者复数体积OCT数据校正计算机程序可以替代地是单独的程序,该单独的程序可以由或者可以不由与基于检测信号 S_d 生成成像目标140的复数体积OCT数据的相同的一个或多个处理器来执行。在其中由第一组一个或多个处理器执行复数体积OCT数据校正计算机程序而由第二组(不同的)一个或多个处理器基于检测信号 S_d 生成成像目标140的复数体积OCT数据的实现中,第一组一个或多个处理器可以通过经由两组处理器之间的适当接口从第二组一个或多个处理器接收成像目标140的复数体积OCT数据,来在图3的过程S10中获取该数据。

[0057] 图4示出了本文的第一示例实施例的非共焦点扫描FD-OCT系统的进一步的细节,以及特别地,在FD-OCT成像系统100以非共焦点扫描扫频源OCT(SS-OCT)成像系统300的形式被提供的情况下,非共焦点扫描FD-OCT系统的组成部件可以如何实现。

[0058] 如图4所示,光束发生器150包括例如波长扫频(wavelength-swept)(或“可调谐”)激光器形式的扫频光源152-1,该扫频光源152-1被布置成在波长范围内随时间(优选线性地)改变由其输出的激光的波长,同时保持窄的瞬时线宽。可调谐激光器可以是本领域技术人员已知的类型的激光器,诸如基于具有Fabry-Perot可调谐滤波器或多边形扫描镜的傅立叶域锁模(FDML)激光器的激光器,或者具有微机电系统(MEMS)的微腔可调谐激光器。扫频源152-1的中值频率根据成像目标来选择,并且在例如眼科应用中通常在光谱的近红外或红外部分中(典型地约1050nm)。

[0059] 由扫频源152-1输出的光被耦合到光纤中,然后被分离器153分成两部分,如在本示例实施例的光纤实现中,分离器153可以是光纤耦合器。在SS-OCT成像系统300的替代的自由空间实现中,分离器153可以替代地以分束器(beam splitter)的形式提供。分离器153的输出之一经由第一光纤154-1沿着第一光路到达分束器310。分离器153的第二输出经由第二光纤154-2沿着第二光路到达分束器320。因此,第二光纤154-2被布置成将来自扫频源152-1的光引导到扫描系统110(经由可选的分束器320引导)。光纤154-1和154-2优选为单模光纤。

[0060] 第一光纤154-1的纤芯的端部提供参考光孔径155-1,参考光束 L_r 从该第一光纤154-1的纤芯的端部入射到分束器310上,并且第二光纤154-2的纤芯的端部提供光源孔径

155-2, 光束 L_b 从该第二光纤154-2的纤芯的端部入射到分束器320上。然而, 在SS-OCT成像系统300的替代的自由空间实现中, 其中分离器153是分束器, 光束 L_b 和参考光束 L_r 的尺寸可以由扫频光源152-1经由作为扫频光源152-1的一部分的针孔、窗口等来设置。

[0061] 分束器320将光束 L_b 反射至扫描系统110, 扫描系统110被布置成在成像目标140上执行光束 L_b 的二维点扫描, 并且收集在点扫描期间由成像目标140散射的光。

[0062] 如在本示例实施例中, 扫描系统110可以包括扫描元件和反射镜, 其中, 扫描系统110被布置成通过扫描元件经由反射镜在成像目标140上扫描光束 L_b 来执行二维点扫描。在WO 2014/53824A1中描述了能够执行宽视野视网膜扫描的这种扫描系统的示例, WO 2014/53824A1的全部内容通过引用在此并入。这种扫描系统的部件在图5中被示出, 并且包括光耦合器111、第一扫描元件112、第一曲面镜113、第二扫描元件114和第二曲面镜115。光束 L_b 经由光耦合器111进入扫描系统110。然后, 光束 L_b 依次被第一扫描元件112、第一曲面镜113、第二扫描元件114和第二曲面镜115反射, 在这之后入射到成像目标140上。已经被成像目标140散射并被扫描系统110收集的光 L_c 沿着与光束 L_b 相同的光路但是以相反的顺序穿过扫描系统110, 并且经由光耦合器111离开扫描系统110。

[0063] 二维点扫描通过以下方式执行: 第一扫描元件112围绕第一轴116旋转, 以在成像目标140上沿第一方向扫描光束 L_b , 以及第二扫描元件114围绕第二轴117旋转, 以在成像目标140上沿第二方向扫描光束 L_b (如在本示例实施例中, 第二方向可以与第一方向正交)。因此, 通过旋转第一扫描元件112和第二扫描元件114, 可以操纵光束 L_b 到达成像目标140上的任何位置。第一扫描元件112和第二扫描元件114的旋转可以由扫描系统控制器(未示出)协调, 使得光束 L_b 根据如上面所讨论的预定义的扫描模式在成像目标140上扫描。

[0064] 在图5的示例中, 第一曲面镜113是椭球面镜(并且被称为狭缝镜), 并且第二曲面镜115也是椭球面镜。每个椭球面镜都有两个焦点。第一扫描元件112设置在第一曲面镜113的第一焦点处, 并且第二扫描元件114设置在第一曲面镜113的第二焦点处。第二扫描元件114也设置在第二曲面镜115的第一焦点处, 并且成像目标140(更具体地, 在本示例中是眼睛的瞳孔)被设置在第二曲面镜115的第二焦点处。

[0065] 如在本示例实施例中, 第一扫描元件112和第二扫描元件114可以各自是检流计(galvanometer)光学扫描仪(或“检流计(galvo)”), 但是可以替代地使用另一种类型的扫描元件, 例如, 诸如MEMS扫描镜或共振扫描镜。

[0066] 再次参考图4, 如在本示例实施例中, 光检测器120可以是包括第一光电检测器124-1和第二光电检测器124-2的平衡式检测器, 在本示例中, 每个光电检测器以光电二极管的形式提供(尽管可以替代地使用其他形式的光电检测器)。光电检测器120还具有跨阻放大器128, 跨阻放大器128基于第一光电检测器124-1和第二光电检测器124-2的输出光电流之间的差生成电压检测信号 S_d 。第一光电检测器124-1和第二光电检测器124-2被布置成分别检测干涉光 L_{i1} 和 L_{i2} , 干涉光 L_{i1} 和 L_{i2} 由参考光 L_r 与由扫描系统110在点扫描期间收集的光 L_c 之间的干涉产生, 该参考光 L_r 和由扫描系统110在点扫描期间收集的光 L_c 在分束器310处叠加。第一光电检测器124-1经由以第三光纤125-1的纤芯的端部形式提供的第一光检测孔径122-1接收干涉光 L_{i1} , 并且第二光电检测器124-2经由以第四光纤125-2的纤芯的端部形式提供的第二光检测孔径122-2接收干涉光 L_{i2} 。如在本示例实施例中, 第三光纤125-1和第四光纤125-2都可以是多模光纤, 并且可以用于将分别来自检测孔径122-1和122-2的光

引导到相应的光电检测器124-1和124-2。这些多模光纤可以具有相同的直径,也可以不具有相同的直径。然而,应当注意,干涉光 L_{i1} 和 L_{i2} 不需要通过光纤125-1和125-2被引导到光电检测器124-1和124-2,并且可以经由相应的检测孔径直接由光电检测器124-1和124-2收集,每个检测孔径以针孔、窗口等形式提供,其形成为光电检测器的一部分。

[0067] 参考光 L_r 与由扫描系统110在点扫描期间收集的所有的光 L_c 干涉。由于光 L_c 包括一定程度的散焦,其可以具有比由光束发生器150生成的光束 L_b 更大的光束尺寸。因此,它也可以具有比参考光 L_r 更大的光束尺寸,因为在本示例实施例中,参考光孔径155-1和光源孔径155-2的尺寸相同,因为相同种类的单模光纤被用于第一光纤154-1和第二光纤154-2两者。为了确保所有收集到的光 L_c 与参考光 L_r 干涉,第一光学系统121(例如,一个或更多个透镜)被包括在SS-OCT成像系统300中,以减小收集到的光 L_c 的光束尺寸,使得其等于或小于参考光 L_r 的光束尺寸。可替代地,不是减小收集到的光 L_c 的光束尺寸,而是可以通过参考光 L_r 所穿过的光学元件(例如,一个或更多个透镜)或者通过使用更大的参考光孔径155-1(例如,通过使用比光纤154-2直径更大的光纤作为光纤154-1)来放大参考光束 L_r 。

[0068] 尽管平衡式光电检测器的使用对于实现增加的信噪比来说通常是优选的,但是在一些示例实施例中,它可以被单个光电检测器所取代。在这样的变型中,将只保留如上所述的光电检测器124-1和124-2中的一个,并且将省略跨阻放大器128,其中该单个光电检测器将检测信号 S_d 输出至OCT数据处理硬件130。

[0069] 在本示例实施例中,多模光纤125-1和125-2用于提供相应的检测孔径122-1和122-2,并将干涉光 L_{i1} 和 L_{i2} 引导至光电检测器124-1和124-2。这与传统的共焦点扫描FD-OCT成像系统有显著的不同,在传统的共焦点扫描FD-OCT成像系统中,单模光纤通常用于这些目的。这是因为在这种传统系统中,干涉仪的样品臂和参考臂通常使用单模光纤来实现(因为使用多模光纤会将模态色散(modal dispersion)引入到其中的光束中)。相同的单模光纤通常用于将样品光束传输到成像目标,并将从成像目标散射的光传输回光耦合器,该光耦合器将来自OCT光源的光分开以沿着干涉仪的样品臂和参考臂行进。散射的光和参考光之间的干涉发生在光耦合器处。在这种传统的光学装置中,单模光纤的端部因此有效地提供光源孔径和检测孔径两者,这与本示例实施例中的不对称布置形成对比,在本示例实施例中,这些孔径由不同光纤的端部提供。因为光检测器120的光纤125-1和125-2用于将干涉光 L_{i1} 和 L_{i2} 引导到相应的光电检测器124-1和124-2,所以模态色散不是问题(因为只有光电检测器处的光子计数是重要的),因此不要求光纤125-1和125-2是单模光纤。

[0070] 第二示例实施例

[0071] 图6是根据本文第二示例实施例的非共焦点扫描光谱域OCT(SD-OCT)成像系统400的示意图。

[0072] 本示例实施例的SD-OCT成像系统400包括与第一示例实施例中相同的扫描系统110、OCT数据处理硬件130、分束器310和320以及第一光学系统121。因此,将不再描述SD-OCT成像系统400的这些部件以及用与图5的第一示例实施例中相同的附图标记进行标记的其他部件。本实施例与图5的第一示例实施例的不同之处在于光检测器120'和光束发生器150'的配置,现在将参考图6描述这些配置。

[0073] 光束发生器150'包括宽带光源152-2,如在本示例实施例中,宽带光源152-2可以是超发光二极管(super-luminescent diode)。光检测器120'包括光谱仪(spectrometer)

129,光谱仪129被布置成测量作为光波长的函数的干涉信号的光谱。在应用傅立叶变换以获得A扫描之前,OCT数据处理硬件130可以在k空间中重新缩放和均匀地采样光谱数据。

[0074] 在前述描述中,参考几个示例实施例描述了示例方面。因此,说明书应被视为说明性的而不是限制性的。类似地,在附图中示出的突出示例实施例的功能和优点的附图仅仅是为了示例目的而被呈现的。示例实施例的体系结构是足够灵活的和可配置的,使得它可以以除了附图中所示的方式以外的方式被利用。

[0075] 在一个示例实施例中,本文提出的示例的一些方面,诸如处理检测信号 S_d 以生成成像目标140的复数体积OCT数据、以及校正算法132,可以作为计算机程序或软件被提供,诸如具有指令或指令序列的一个或多个程序,该指令或指令序列被包括或存储在诸如机器可访问或机器可读介质、指令储存装置或计算机可读存储设备的制品中,机器可访问或机器可读介质、指令储存装置或计算机可读存储设备中的每一个都可以是非暂时性的。在非暂时性机器可访问介质、机器可读介质、指令储存装置、或计算机可读存储设备上的程序或指令可用于对计算机系统或其他电子设备编程。机器可读介质或计算机可读介质、指令储存装置和存储设备可以包括但不限于软盘、光盘和磁光盘或适合于存储或传输电子指令的其他类型的介质/机器可读介质/指令储存装置/存储设备。本文描述的技术不限于任何特定的软件配置。它们可能在任何计算或处理环境中得到应用。本文使用的术语“计算机可读”、“机器可访问介质”、“机器可读介质”、“指令储存装置”、和“计算机可读存储设备”应当包括能够存储、编码、或传输指令或指令序列以供机器、计算机、或计算机处理器执行并且使机器/计算机/计算机处理器执行本文描述的方法中的任一个方法的任何介质。此外,在本领域中常见的是以一种或另一种形式(例如,程序(program)、过程(procedure)、进程、应用、模块、单元、逻辑等)提及软件作为采取动作或引起结果。这种表达仅仅是陈述由处理系统执行软件使处理器执行动作以产生结果的简略方式。

[0076] OCT数据处理硬件130的一些或所有功能也可以通过准备专用集成电路、现场可编程门阵列或通过传统部件电路的适当网络互连来实现。

[0077] 计算机程序产品可以以一种或更多种存储介质、指令储存装置(多个指令储存装置)或存储设备(多个存储设备)的形式提供,该一种或更多种存储介质、指令储存装置或存储设备在其上或其中存储有可用于控制或促使计算机或计算机处理器执行本文所述的示例实施例的任何过程的指令。存储介质/指令储存装置/存储设备可以作为示例且非限制性地包括光盘、ROM、RAM、EPROM、EEPROM、DRAM、VRAM、闪存、闪存卡、磁卡、光卡、纳米系统、分子存储器集成电路、RAID、远程数据存储/存档/仓储装置、和/或适合于存储指令和/或数据的任何其他类型的设备。

[0078] 存储在一种或更多种计算机可读介质、指令储存装置(多个指令储存装置)、或存储设备(多个存储设备)中的任一者上的一些实现包括用于控制系统的硬件和用于使系统或微处理器能够利用本文描述的示例实施例的结果与人类用户或其他机构交互的软件。这种软件可以非限制性地包括设备驱动器、操作系统和用户应用。最终,如上所述,这种计算机可读介质或存储设备还包括用于执行本发明的示例方面的软件。

[0079] 在系统的编程和/或软件中包括用于实现本文描述的过程的软件模块。在本文的一些示例实施例中,模块包括软件,但是在本文的其他示例实施例中,模块包括硬件或硬件和软件的组合。

[0080] 虽然在上面描述了本发明的各种示例实施例,但是应该理解,它们通过示例而非限制的方式被呈现。对在相关领域中的技术人员将明显的是,可以在形式和细节上做出各种改变。因此,本发明不应受上述示例实施例中的任一个的限制,而应仅根据随附的权利要求及其等同物来被定义。

[0081] 此外,摘要的目的是使通常专利局和公众、以及尤其是不熟悉专利或法律术语或措辞的本领域中的科学家、工程师和从业人员能够根据粗略的检查快速确定本申请的技术公开的性质和本质。摘要并不意欲以任何方式关于在本文呈现的示例实施例的范围进行限制。还应该理解的是,在权利要求中叙述的任何过程不需要以所呈现的顺序来执行。

[0082] 虽然本说明书包含很多具体实施例细节,但这些不应该理解为对任何发明内容或可能要求保护的内容的范围的限制,而应该理解为是特定于本文描述的特定实施例的特征的描述。本说明书中在单独的实施例的背景下所描述的某些特征也可在单个实施例中以组合实现。相反地,也可以在多个实施例中单独地或以任何合适的子组合实现在单一实施例的背景下描述的各种特征。此外,尽管特征在上文中可被描述为作用在特定组合中并甚至起初如此要求保护,但是来自所要求保护的组合的一个或多个特征可在一些情况下从组合中删除,且所要求保护的组合可针对子组合或子组合的变体。

[0083] 在某些情形下,多任务和并行处理可能是有利的。此外,上述实施例中的各种组成部分的分离不应被理解为在所有实施例中都需要这样的分离,并且应当理解,所描述的程序组成部分和系统通常可以一起集成在单个软件产品中或者封装到多个软件产品内。

[0084] 现在已经描述了一些说明性实施例和实施例,显然,前面的实施例是说明性的而不是限制性的,已经通过示例的方式呈现。特别地,尽管本文呈现的许多示例涉及装置或软件元素的特定组合,但是这些元素可以以其他方式组合以实现相同的目的。仅结合一个实施例讨论的动作、元素和特征并不意欲从实施例或其他实施例中的类似角色中被排除。

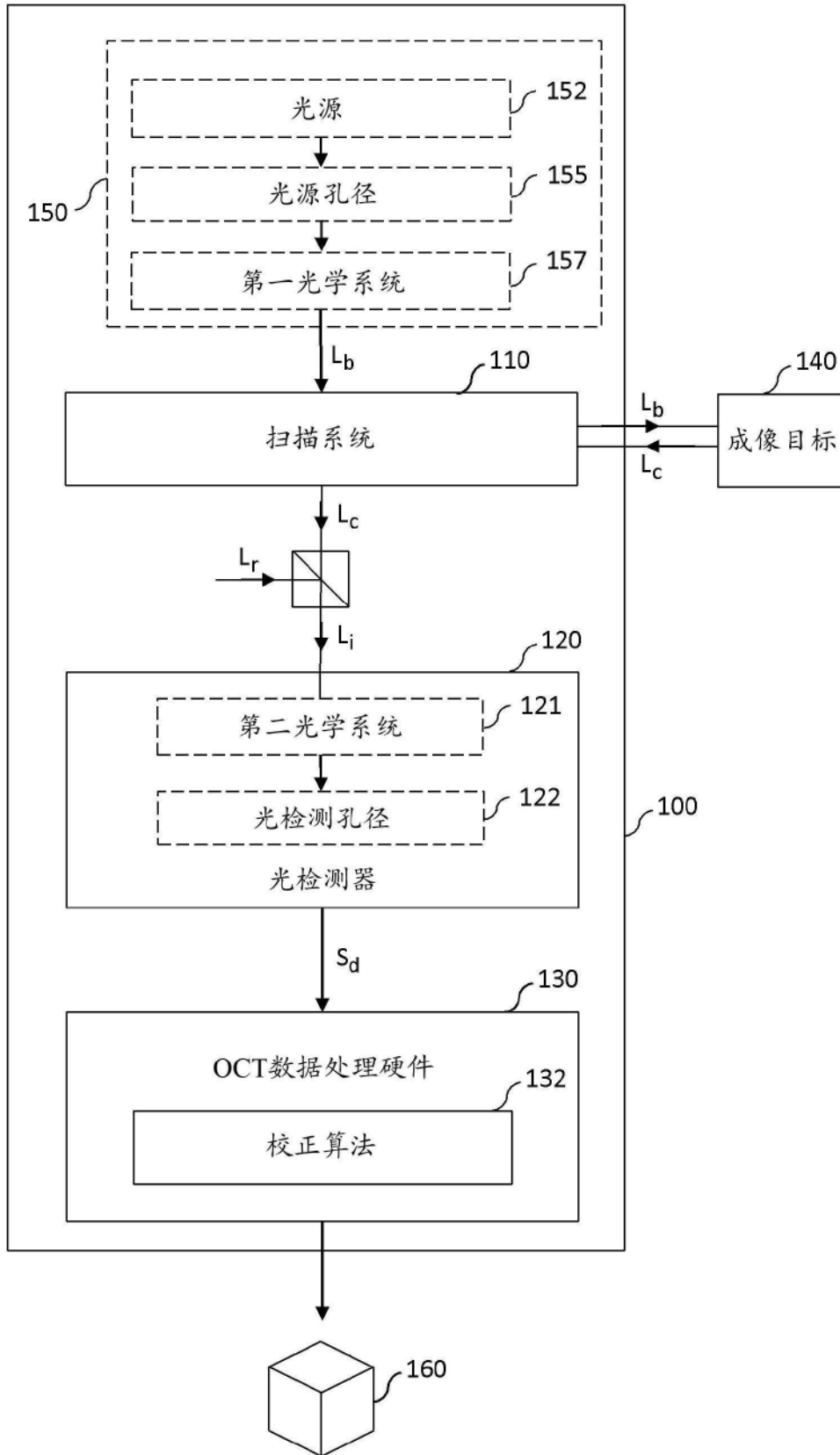


图1

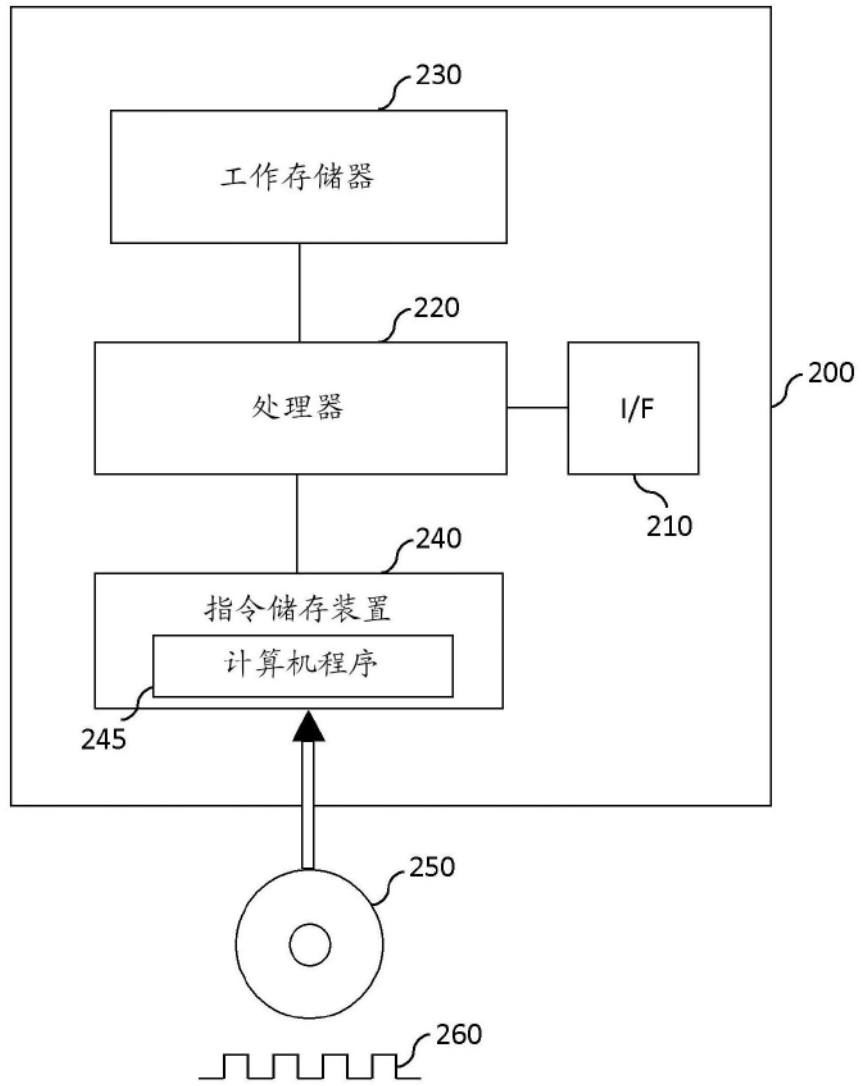


图2

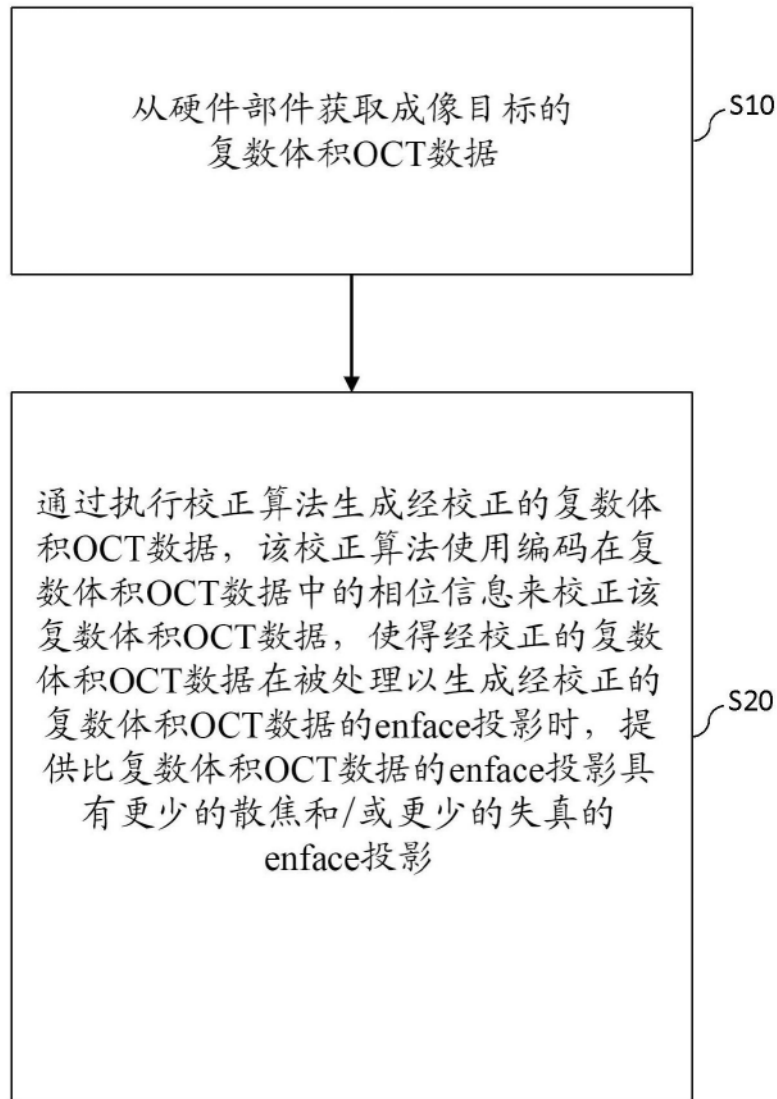


图3

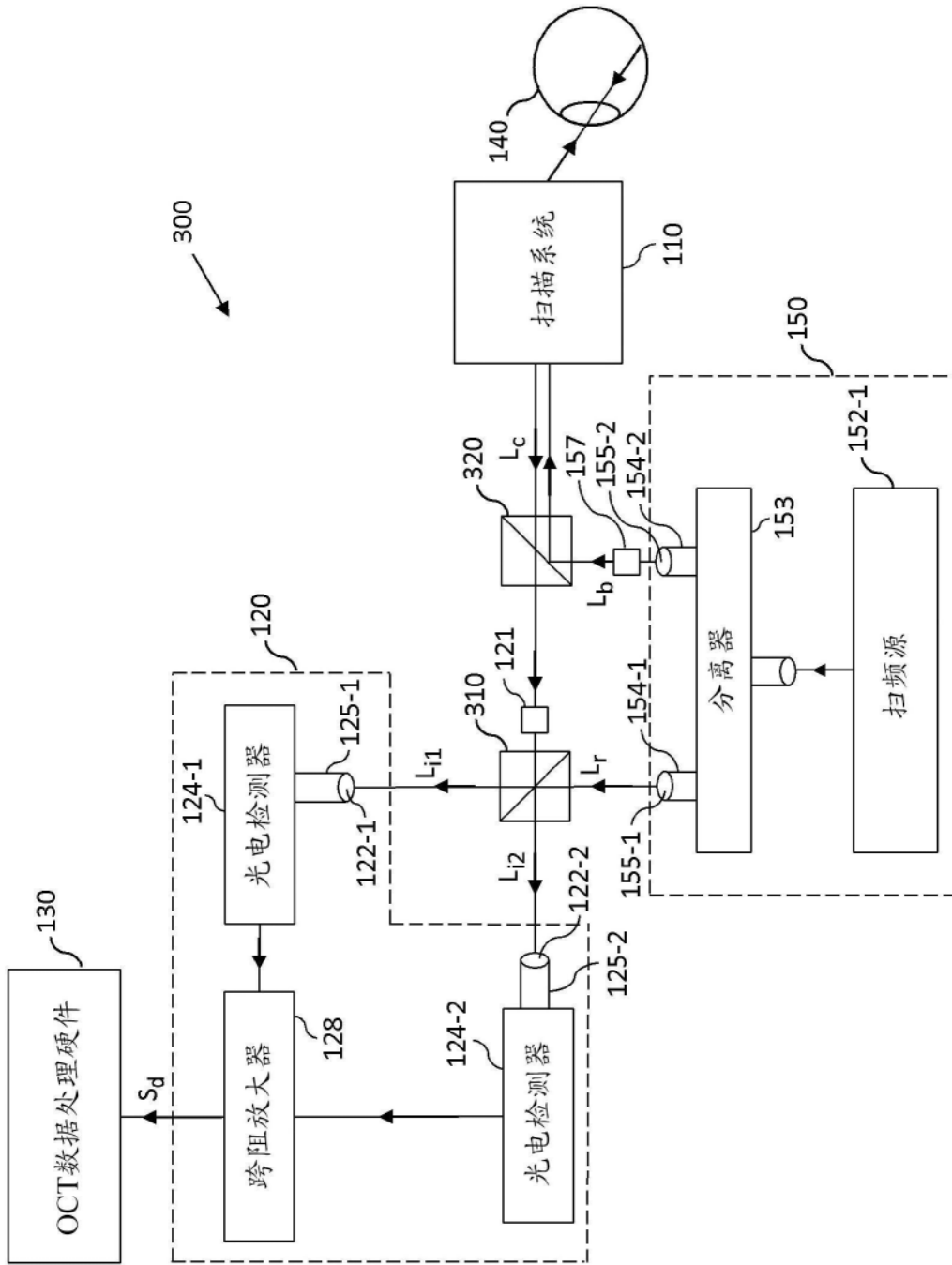


图4

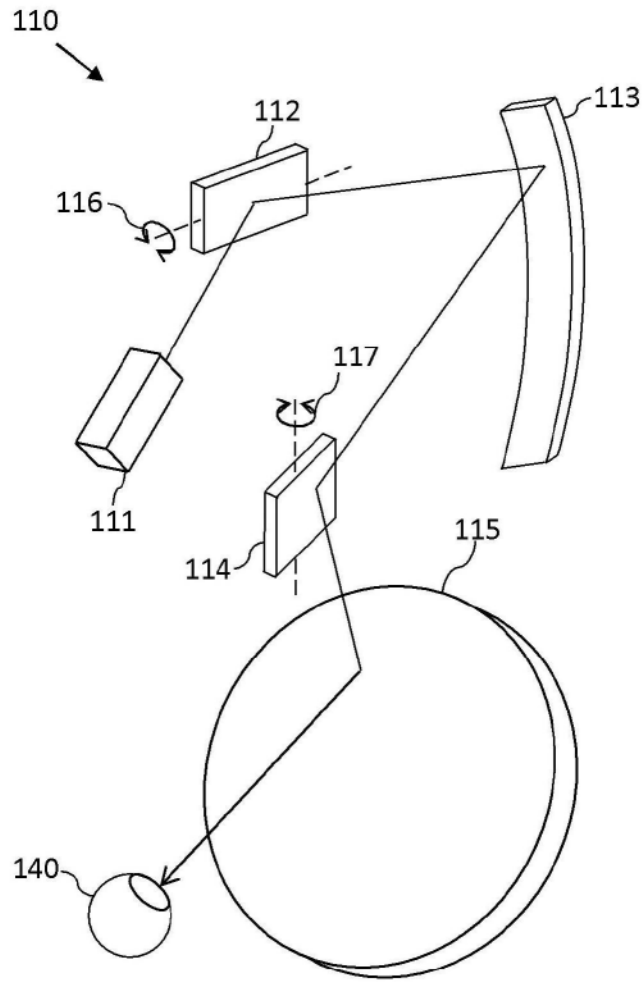


图5

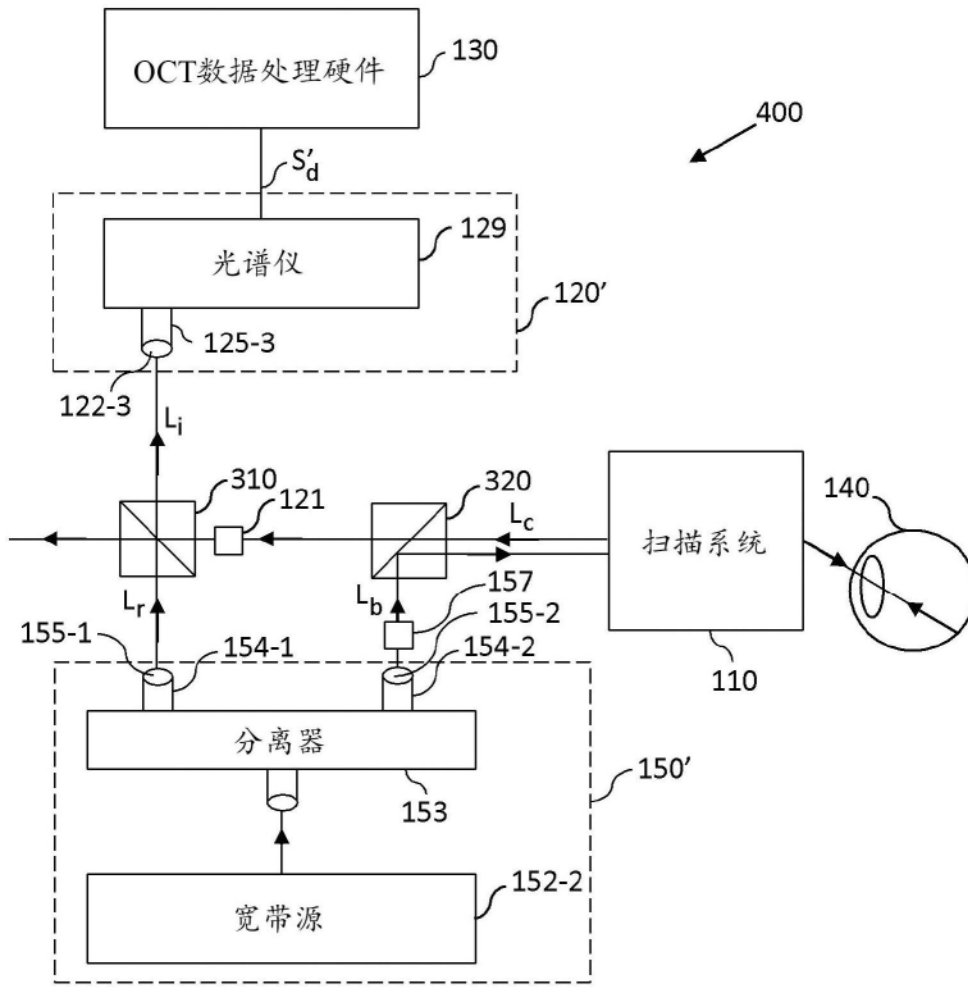


图6