光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.2019.04.019

Aug. 2019

一种可实现入瞳位置不变的超广角 扫频光相干层析成像系统

汤剑宇¹,王颖奇²,霍 力¹

(1. 清华大学 电子工程系 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京图湃影像科技有限公司, 北京 100084)

摘 要: 报道了一种可实现入瞳位置不变的超广角扫频光相干层析成像(OCT)系统,对成 像系统的样品臂进行了建模和光学仿真,证实其可行性和有效性。设计并展示了一个超广角 OCT 成像系统,在仅改变振镜位置及透镜间距的情况下,实现了超过 40°的眼底单次超大角度扫描,单 次横向扫描范围覆盖眼底 I 区,有效增加了 OCT 单次扫描的成像范围。

关键词: 扫频光学相干层析; 超广角; 眼底成像; 光学设计; 光学仿真 中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-5868(2019)04-0546-04

Swept-source Optical Coherence Tomography System with Ultra-wide Field and Invariable Position of Incident Pupil

TANG Jianyu¹, WANG Yingqi², HUO Li¹

(1. State Key Lab. on Integrated Optoelectron., Dept. of Electron. Engin., Tsinghua University, Beijing 100084, CHN; 2. Beijing TOPI Imaging Technol. Co. Ltd., Beijing 100084, CHN)

Abstract: Proposed is a swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) system with ultra-wide field and invariable position of incident pupil. Modeling and optical simulations of the OCT's sample arm were carried out to verify the feasibility and effectiveness of the OCT system. And an SS-OCT system with ultra-wide field was designed and presented. With only changing the position of galvanometers and the distance between lens, more than 40° angle of a single transverse scan was realized, in which the total I area of fundus was covered. As a result, the imaging range of OCT in a single scan was effectively increased.

Key words: swept-source optical coherence tomography; ultra-wide field; fundus imaging; optical design; optical simulation

0 引言

相干 层 析 成 像 技 术 (Optical Coherence Tomography,OCT)是一种无入侵、高灵敏度、高速 度的成像方式,被广泛应用于医学成像,特别是眼科 成像中^[1-2]。自 1995 年波士顿的新英格兰眼科中心 将其在临床上正式应用以来,OCT 技术已历经 20 余年的发展,图像质量不断提升。目前,OCT 已成 为最重要的眼底疾病影像诊断技术,绝大部分眼底 疾病都需要通过 OCT 影像数据进行确诊。

收稿日期:2019-03-04.

• 546 •

在临床诊断中,OCT 的眼底扫描视场角度非常 重要,扫描视场角度越大,对应的视网膜成像范围越 大。现有的眼底 OCT 扫描视场角度一般为 20°~ 30°,对应的眼底视网膜扫描长度约为 7~10 mm(弧 长),仅能覆盖黄斑区,无法捕捉到视网膜边缘区域 的影像。一些从边缘新生脉络膜开始逐渐向中央凹 扩张的病变,以及边缘区域的视网膜脱落等眼底疾 病,很难通过单次拍摄及时发现,在临床上容易被漏 诊。因此,提高 OCT 的单次最大扫描长度,有利于 对疾病进行初步的筛查诊断与治疗,对于减少漏诊、 提升诊断效率具有重要意义。有学者对 OCT 的成 像范围进行了研究^[3-5],Song 等人使用广角透镜实 现了人体手部和面部的分米量级横向成像范围, Lou 等人采用多样品臂实现了对 OCT 成像视场的 成倍扩展。

本文提出一种超广角的扫频 OCT 系统,并对 其样品臂端进行光学仿真和参数优化,实现了入瞳 位置基本不变,得到了超过 40°的单次超大角度扫 描眼底图像。

1 扫频 OCT 的成像视场范围

典型的眼底 OCT 系统的样品臂光路结构图如 图 1 所示^[2]。扫频光通过准直器准直后,近似于一 束平行光,打在扫描振镜上,通过一系列的光学透 镜,最后通过瞳孔照射在视网膜上。视网膜受到照 射后的散射光反过来沿着这一光路传播,并与参考 臂的光发生干涉,采集到的光信号经过傅里叶变换 等处理后得到视网膜的扫描图像。这种光学系统一 般统称为"4*f* 系统"。



成像范围是 OCT 的重要性能之一。OCT 系统 的成像视场范围体现在纵向视场和横向视场上,其 中纵向视场主要由物理上的成像深度和视场范围决 定。瞬时线宽窄的光源穿透能力更强,成像更深。 目前所采用的中心波长为 1 060 nm、谱宽为 120 nm 的扫频光源处在"生物光窗口"上,对光的吸收较小, 物理上的穿透深度可达 4~5 mm。根据干涉理论 有:

$$I(k) = I_{r}(k) + I_{s}(k) + 2\sqrt{I_{r}(k)I_{s}(k)}\sum b_{n}\cos(kz_{n})$$
(1)

其中,k 为探测光波数,I(k)为对应波数 k 时探测器 接收到的干涉信号强度, $I_r(k)$ 和 $I_s(k)$ 分别为参考 臂和样品臂的散射信号, b_n 为深度 z_n 处的样品反 射率相关系数。由式(1)可知,得到干涉信号强度与 探测光波数的关系,进行傅里叶变换后即可获得样 品的深度信息。数字处理系统中,利用数据采集卡 采样获得干涉数据,再对其进行快速傅里叶变换。 由奈奎斯特采样定理可知,波数空间的采样密度 Δk 决定了 OCT 在深度方向上的视场大小,最大视场 为采样率的一半:

$$D_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{\Delta k} \tag{2}$$

超过最大视场的样品信息将对计算结果形成镜像的 干扰,影响成像质量。

横向视场范围主要由振镜的扫描范围决定,振 镜的扫描角度越大,成像的范围就越大。但是由于 人眼是一个很特殊的结构,入射光必须通过瞳孔进 入人眼照在视网膜上。正常人眼瞳孔的直径一般为 $2\sim5 \text{ mm}$,需要十分精准的光路才能将扫描光照入 眼底。减小光束直径能使入射光更容易进入瞳孔, 而图像的横向分辨率 Δx 为

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{d} \tag{3}$$

其中,λ为入射光波长,f为透镜焦距,d为光束直 径。可以看出,减小光束直径会影响图像的横向分 辨率。

通常的眼底 OCT 采用的是一个 4f 光学系 统^[6-7],即扫描振镜距第一个透镜距离为透镜焦距 f,两个透镜之间的距离为 2 倍 f,瞳孔距物镜的焦 距 f。理论上振镜位于第一个透镜焦点处,与瞳孔 互为共轭位置,可保证振镜振动时平行光始终经过 瞳孔处。而实际上,由于存在两个方向的振镜,体积 不能无限小,无法使它们都位于透镜焦点处,所以会 产生误差,在较小扫描角度下,入瞳位置基本不变, 但是在较大扫描角度下(大于 20°),入瞳位置会发 生严重偏移,使得光束无法穿过瞳孔。而且横向及 纵向扫描振镜反射的光束经过 2~3 块透镜后,光斑 会产生较大的横向畸变和纵向畸变,从而限制了振 镜的扫描角度,成像范围也受到限制。

有方案提出用 MEMS 振镜^[8],由于 MEMS 振 镜可实现单镜片双轴扫描,因此可以保证入瞳位置 不变。但 MEMS 振镜的稳定性和可靠性较差,使用 寿命较短,在 4*f* 系统中光斑在扫描角度较大时同 样会出现较大的横向畸变和纵向畸变。

2 超广角扫频 OCT 模型仿真

鉴于以上分析,我们提出一种超广角的扫频

• 547 •

OCT 系统。在该系统中,我们将 $X \ Y$ 两轴扫描振 镜分开独立放置,且放置位置选定在指定透镜的前 后焦点处。同时,精确设置透镜之间的距离,使系统 满足光束变换及变焦需求,即准直器入射光和接目 物镜出射光束均为准直光束。在此基础上,进一步 将 X 轴扫描振镜的位置提前到第二块透镜的前焦 点处,使得光束经 X 轴扫描振镜反射后,只通过接 目物镜这一块透镜,以最大程度减小出射光斑的畸 变。

对光路进行仿真,优化后的光路仿真结果如图 2所示。为了和 4f系统的效果进行对比,图中透镜 均选用 Thorlabs 公司生产的 AC-254-30-B 型号的 双胶合透镜。入射准直光直径为 2 mm,波长为 1060 nm,瞳孔直径取较小值设置为 3 mm,以使效 果更明显,X和 Y 轴振镜的扫描角度均设置为 0° 、 1°、2°、3°和4°。可以看到在一个相当大的扫描角度 范围内,平行光始终能从瞳孔处射入眼底,即入瞳位 置不变,瞳孔处扫描光斑覆盖直径为 2.020 mm,远 小于瞳孔的直径 3 mm,对应的眼底 B-scan 成像范 围为 8.388 mm。从图中可以看到,物镜的大小限制 了光束的扫描范围。如果将物镜换为大尺寸的透 镜,可以实现更大的扫描范围。这里为了与4f系 统进行对比,所以采用了相同的口径较小的透镜。 扫描后的平行光通过瞳孔,在人眼晶状体的汇聚作 用下,最终聚焦在视网膜上。



通常的 4*f* 系统的仿真如图 3 所示。其中两透 镜型号同样为 Thorlabs 公司生产的 AC-254-30-B, 为防止振镜碰撞,两块振镜的间隔设置为 14 mm, 两振镜以第一块透镜的焦点为中心分别位于其前后 7 mm 的位置,瞳孔位于第二块透镜的焦点处。从 图中可以很明显地看到,当扫描角度过大,即大于 3°时,入射光无法完全通过瞳孔进入人眼。经过仿 真计算得,扫描角度达到 3°时,瞳孔处的扫描光斑 覆盖直径为 4.968 mm,达到 4°时,扫描光斑覆盖直 径达到 6.638 mm。扫描范围过大会使大部分扫描 光无法进入人眼,当扫描范围为 2°时,对应的有效 B-scan 最大成像范围仅为 3.496 mm,远小于超广角 OCT 的成像范围,由此可见设计的光学系统可在相 当大的程度上增加 B-scan 的横向成像范围。



3 超广角扫频 OCT 成像实验

设计的超广角扫频 OCT 实验装置如图 4 所示。系统主要分为扫频光源、样品臂、参考臂、信号 采集以及计算机控制和处理等几部分。扫频光源为 Axsun 公司生产的扫频激光器,中心波长为 1060 nm,谱宽为 120 nm,扫频速度为 200 kHz,输 出功率为 18 mW。采集卡使用 AlazarTech 公司的 ATS9360 型号,双通道为 12 bit,实时采集速率可达 1.8 GS/s。



图 5 是实验测得的 OCT 成像系统的点扩散函数(PSF)图。从图中可以计算得到成像系统的分辨 率为9.3 µm,6 dB滚降长度为8.5 mm,灵敏度为





图 6 眼底 I 区 B-scan 影像

106 dB。单次采集到的眼底 B-scan 图像如图 6 所 示。纵向穿透整个脉络膜,横向最大扫描长度达到 14 mm,对应眼底扫描角度约 42°,横向长度接近整 个眼底 I 区范围,且边缘细节呈现没有出现失真的 情况。

4 结论

本文提出了一种可实现入瞳位置不变的超广角 扫频 OCT 系统,并对其进行优化,经过光学仿真计 算,证明了其可行性和可靠性。进一步通过实验验 证,实现了入瞳位置基本不变,有效地解决了 4*f* 系 统中两块振镜与焦平面不重合的问题,得到了超大 范围的视网膜图像。该方法没有增加系统的复杂 度,仅需改变振镜的位置,适当调整透镜间距,简单 可行且可靠,是一种增加 OCT 成像范围的有效方 法,能够有效减少医生依据眼底 OCT 影像进行临 床诊断时的漏诊率。

参考文献:

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [2] Fujimoto J G, Drexler W. Introduction to OCT [M]. Switzerland: Springer Inter. Publishing, 2015.
- [3] Song S, Xu J, Wang R K. Long-range and wide field of view optical coherence tomography for in vivo 3D imaging of large volume object based on akinetic programmable swept source [J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(11), 4734-4748.
- [4] 娄 帆,霍 力.一种多样品臂扫频光学相干层析系统[J].半
 导体光电,2017,38(5):751-753.
 Lou Fan, Huo Li. Swept—source optical coherence tomography system with multiple sample arms [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5):751-753.
- [5] Xing Yanfei, Wang Yingqi. A biaxial scanning optical coherence tomography system with invariable position of incident pupil: CN108627975A[P]. 2018-10-09.
- [6] Huttmann G, Koch P, Birngruber R. Linear OCT Systems[M]. Switzerland: Springer Inter. Publishing, 2015.
- [7] Grulkowski I, Liu J J, Potsaid B, et al. Ultrahigh Speed OCT[M]. Switzerland: Springer Inter. Publishing, 2015.
- [8] Hu Z L, Rollins A M. Optical Design for OCT [M]. Switzerland: Springer Inter. Publishing, 2015: 357.

作者简介:

汤剑宇(1994一),男,硕士研究生,主要研究方 向为扫频 OCT 成像技术。

```
E-mail: tangjy16@mails.tsinghua.edu.cn
```

Documents, 1999, 22(2): 363-381.

(**上接第**545页)

- [21] 贺利乐,路二伟,李赵兴,等. 基于 ORB 算子的快速立体匹配算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(1): 190-194.
 He Lile, Lu Erwei, Li Zhaoxing, et al. Fast stereo matching algorithm based on ORB operator [J]. Computer Engin. and Applications, 2017, 53(1): 190-194.
- [22] 卢胜男,李小和.结合双向光流约束的特征点匹配车辆跟踪 方法[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(4):76-82.
 Lu Shengnan, Li Xiaohe. Vehicle tracking method using feature point matching combined with bidirectional optical flow[J]. J. of Transportation Systems Engin. and Information Technol., 2017,17(4):76-82.
- [23] Gibson J J. The Perception of The Visual World [M]. Oxford: Houghton Mifflin, 1950: 172.
- [24] Bradski G R, Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision in C++ with The OpenCV Library[M]. California: O'Reilly Media, 2013.
- [25] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]// Inter. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 1981: 674-679.
- [26] Bouguet J Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade

feature tracker description of the algorithm [J]. Opency

- [27] Fischler M A. Readings in Computer Vision II Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Readings in Computer Vision, 1987: 726-740.
- [28] Blanco-Claraco J L, Moreno-Duenas F A, Gonzalez-Jimenez J. The Malaga Urban Dataset: High-Rate Stereo and LiDAR in A Realistic Urban Scenario [M]. California: Sage Publications Inc., 2014.
- [29] Smith M, Baldwin I, Churchill W, et al. The new college vision and laser dataset[J]. Inter. J. of Robotics Research, 2009, 28(5): 595-599.

作者简介:

赵明富(1964一),男,博士,教授,硕士生导师, 电子科技大学兼职博士生导师,研究方向为光纤生 物化学传感、光电信息获取与智能信息处理和现代 光电检测技术。

E-mail: zmf@cqut.edu.cn

• 549 •