



基于光学反射层析成像技术的全场前房角测量*

刘碧旺^{1,2)} 钟俊平^{1)**} 林海纳¹⁾ 曾亚光^{1)**} 余有平¹⁾ 李泓毅¹⁾ 韩定安¹⁾ 陈金莺^{3)**}⁽¹⁾ 佛山大学物理与光电工程学院粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 佛山 528225;⁽²⁾ 佛山大学机电工程与自动化学院, 佛山 528225; ⁽³⁾ 暨南大学第一附属医院眼科, 广州 510632)

摘要 **目的** 闭角型青光眼 (ACG) 是主要的致盲性眼病之一, 研究前房角对闭角型青光眼的诊断具有重要价值。目前, 前房角的检查方法包括裂隙灯前房角镜检查、水前房角镜检查、超声生物显微镜 (UBM) 和眼前节光学相干层析成像 (AS-OCT) 等。裂隙灯前房角镜检查和水前房角镜检查便于观察前房角结构, 但存在侵入性操作和眼部感染的风险; UBM 能精确测量前房角的细微结构, 但操作复杂且不适用于经历过外伤或接受过眼科手术的患者; 而 AS-OCT 虽能提供详细的前房角图像, 但设备成本较高。本研究旨在探索一种能够低成本实现全场前房角测量的非侵入、无损伤的光学反射层析成像技术 (ORT), 实现对猪眼三维结构成像和前房角的全场测量。**方法** 搭建了由 CMOS 相机、远心系统、电机和白光源组成的光学反射层析成像系统, 其空间分辨率为 $\sim 8.5 \mu\text{m}$ 。采集 $0 \sim 2\pi$ 范围内的反射投影信息, 经滤波反射层析算法处理得到三维结构图像, 并测量出全场前房角度数。**结果** 本研究使用 ORT 技术成功采集了猪眼的反射投影数据, 重建出其三维结构图像, 并测量了前房角度数。重建的三维图像清晰展示了巩膜和虹膜等重要结构, 并与实物图的结构一一对应。将 ORT 与光学相干层析成像系统对猪眼前房角度数的测量结果进行对比, 显示两种方法的平均差值为 0.51° , 均方误差 M_{SE} 为 0.317 。**结论** ORT 是一种非侵入、无损伤、成本低和成像分辨率高的技术, 能够实现猪眼的三维结构成像和全场前房角测量。该技术为闭角型青光眼的诊断提供了新的视角, 对眼科疾病的筛查、诊断和监测具有重要的临床价值。

关键词 闭角型青光眼, 全场前房角, 光学反射层析成像**中图分类号** O439, Q-334**DOI:** 10.16476/j.pibb.2023.0480

青光眼是一种不可逆的致盲性眼病, 它可能会在不知不觉中损伤视神经, 导致视觉功能下降或者视野缺损, 甚至失明, 因此被称为“盗走光明的小偷”^[1-4]。青光眼与前房角 (anterior chamber angle, ACA) 之间存在密切的关系, 前房角的状态对青光眼的发病和治疗具有重要影响。前房角角度是指角膜后表面与其对面的周边虹膜的夹角, 在闭角型青光眼 (angle-closure glaucoma, ACG) 中, 由于晶状体膨隆或者高褶虹膜, 导致虹膜与角膜之间的角度变小, 从而影响房水的流通^[5-9]。因此, 早期筛查和诊治闭角型青光眼非常重要, 可以避免不可逆的器质性损伤^[10-12]。前房角角度的状态对青光眼的类型和治疗方案有重要影响。因此, 准确测量前房角角度并了解其特征是对青光眼患者进行诊断和治疗的关键步骤^[13-17]。

前房角检查方法主要包括裂隙灯前房角镜检查^[18-20]、水前房角镜检查^[21]、超声生物显微镜

(ultrasound biomicroscope, UBM)^[22-23] 和眼前节光学相干层析成像 (anterior segment optical coherence tomography, AS-OCT)^[24-25] 等。裂隙灯前房角镜检查需要对患者的结膜囊表面进行麻醉, 配合裂隙灯显微镜使用并将房角镜置于结膜囊内, 能够详细观察前房角结构。但是这种侵入性操作可能因为加压产生人为因素的误差以及出现眼部感染等问题, 同时需要被检查者高度配合^[18-20]。水前

* 广东省重点领域研究与发展计划 (2020B1111040001), 国家自然科学基金 (61705036, 61771139, 61805038), 广州市科技计划 (202201010618), 广东省医学科研基金 (A2022415), 中央高校基本科研业务费专项资金 (21621052) 和粤港澳智能微纳光电技术联合实验室 (2020B1212030010) 资助项目。

** 通讯联系人。

钟俊平 Tel: 13268286089, E-mail: zjp85@126.com

曾亚光 Tel: 13590668561, E-mail: zeng.yg@163.com

陈金莺 Tel: 15017541741, E-mail: chenjy0907@126.com

收稿日期: 2023-12-07, 接受日期: 2024-03-22

房角镜检查为房角可视化提供了更低的放大倍率、超宽视野, 但仍不可避免地存在侵入性操作^[21]。UBM利用超声波技术可以活体检查前房角区的细微结构(分辨率可达到50 μm), 除了能准确测量前房深度和房角的宽度外, 其最大的优点就是能直观地展现前房角、虹膜及睫状体等结构。缺点是需要局部麻醉, 使用时需要在结膜囊中置入水杯, 操作复杂, 不能用于外伤及眼部手术后患者, 对检查者和被检查者要求较高^[22-23]。Zhu等^[23]使用UBM分类来评估眼前节重建在先天性纤维血管性瞳孔膜诱发的继发性青光眼中的有效性和安全性。光学相干层析成像(optical coherence tomography, OCT)在眼科领域中已经发挥了关键作用, 为临床诊断和治疗提供了精确的图像数据。这项技术特别适用于视网膜^[26-27]和前房角^[28]的成像, 其高分辨率和非侵入性特性使其在眼科研究中不可或缺。尤其是在评估和监控青光眼这类疾病时, OCT的作用尤为显著^[29]。其中, AS-OCT能获取眼前节图像并定量测量前房角, 但这种设备复杂、成本较高。Xu等^[30]使用AS-OCT, 通过将深度学习方法应用于人群的前房角镜检查, 实现了前房角闭合和原发性闭角型青光眼的全自动分类器的开发和测试。Hao等^[31]通过将在黑暗和明亮光照条件下采集的AS-OCT图像送入多序列深度网络结构中, 实现了前房角的三分类。

三维成像技术在各种生物功能研究中扮演着不可或缺的角色, 通过对生物样品的三维成像, 可以了解生物样品的复杂结构^[32-34]。本文使用光学反射层析成像(optical reflection tomography, ORT), 在无需使用增透剂下实现了对猪眼的三维结构成像和前房角的全场测量。该成像系统由CMOS相机、远心系统、电机和白光光源组成, 其空间分辨率约为8.5 μm。这项技术的优点包括: a. 使用白光进行照明, 从而避免了激光对眼睛可能造成的潜在损害; b. 成本低、成像分辨率高, 可惠及偏远地区的诊所和小医院; c. 能够同时实现三维结构成像和前房角全场测量, 使用ORT重建出猪眼三维结构后, 可以在任意角度测量猪眼的前房角度数。这项技术对于眼睛相关疾病的筛查、诊断和随访具有重要的意义。

1 系统与方法

1.1 光学反射层析成像系统

图1显示了ORT系统的成像原理与三维模型。

其中, CMOS表示互补金属氧化物半导体相机(acA2040-180kmNIR, Basler), 其像素尺寸为5.5 μm×5.5 μm, 分辨率为4 MP。TS表示定制的远心系统(Edmund optics 58428), 景深为9.67 mm, 空间分辨率约为8.5 μm, 光圈为0.025, 放大率为0.3倍。PE表示猪眼, 作为ORT的实验样品, PD为培养皿, 用于放置猪眼。2D-TS表示二维平移台, 用于调整样品台的位置。SM表示步进电机, 可以带动样品台绕自身中心轴旋转。WLS表示白光光源(LA-150FBU, HAYASHI), 其为直流点灯方式的卤素光源灯, 用于照明猪眼, 可更换为其他白光光源。3D-TS表示三维平移台, 用于调整相机的焦点位置和成像区域。图1a所示为成像系统的光路原理图, 使用白光对猪眼进行照明, 猪眼的二维图像信息经过远心系统后, 被相机捕获。图1b所示为数据采集原理图, 猪眼放置于成像系统视场中央, 远心系统安装在相机上, 猪眼跟随步进电机绕自身中心轴旋转, 每个角度采集一张曝光时间为1.0 ms的投影图像, 步进电机旋转的角度间隔为2°, 共采集180个角度的投影信息。图1c所示为成像系统的三维模型图, 白光倾斜入射, 照在猪眼的上部。光源的倾斜角度被控制在10°~45°, 以确保照明可以覆盖猪眼样品的整个表面, 并且能够有效捕捉反射光信息。最后使用CMOS相机捕获每个反射投影角位置的原始光强图像。在实验中, 使用了16位高速模拟输出板(NI PCI-6221)来同步和触发CMOS相机采集和步进电机旋转。该研究遵循《赫尔辛基宣言》的原则, 并得到了佛山大学动物实验对象技术委员会的批准(批号: 120105)。

1.2 成像方法

本文提出的ORT技术从不同角度检测样品的光学反射投影, 使用改进的滤波反投影算法从反射投影数据重建样品的三维结构图像。当投影角度 θ 一定时, 光学投影数据 $p(r, \theta)$ 可表示为:

$$p(r, \theta) = \int_{L_{r, \theta}} f(x, y) ds \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 表示为相机接收到的光学投影信号, $L_{r, \theta}$ 表示线 $r = x \cos \theta + y \sin \theta$, r 为在 θ 方向上积分路径的空间变量, s 为沿线 $L_{r, \theta}$ 的弧长^[35]。图像中的每一条线都唯一对应于参数空间中的一个点, 且 $0 \leq \theta < 2\pi$, $0 \leq r \leq r_{\max}$, $r_{\max}$ 由图像空间的大小决定。实验样品是半透光的猪眼, 接收的信号来自猪眼角膜、虹膜、房水等的反射信号, 因此存在一个衰减系数 $c_{\theta}(x, y)$, 使得在某一投影角度 θ 处的光

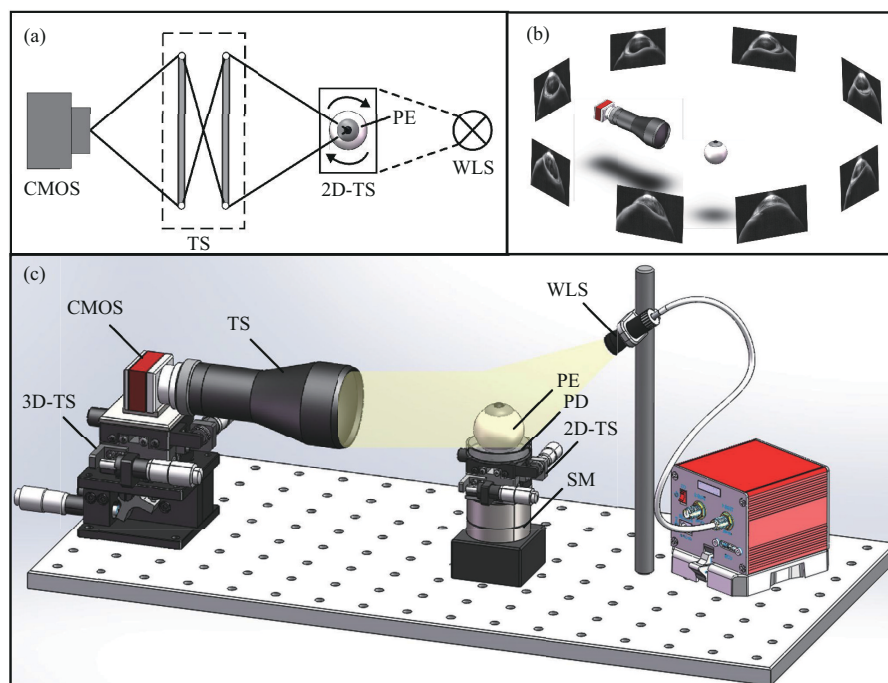


Fig. 1 Optical reflection tomography system

(a) Imaging system schematic. (b) Schematic diagram of the imaging system sampling. (c) 3D structural diagram of the imaging system. Composed of complementary metal oxide semiconductor (CMOS), telecentric system (TS), 3D-translation stage (3D-TS), porcine eye (PE), Petri dish (PD), 2D-translation stage (2D-TS), stepper motor (SM), white light source (WLS).

学反射投影数据 $P_\theta(r, \theta)$ 为:

$$P_\theta(r, \theta) = \int_{L_{r,\theta}} f(x, y) \times c_\theta(x, y) ds \quad (2)$$

反投影通常会出现星迹伪影, 为了提高重建质量, 在滤波反投影中使用下式进行修正:

$$h(r, \theta) = F_1^{-1}(|k|F_1(P_\theta(r, \theta))) \quad (3)$$

式中, $h(r, \theta)$ 为修正后的滤波反投影数据, k 是空间频率, F_1 和 F_1^{-1} 分别表示相对于空间向量 r 的一维傅里叶变换及其逆变换。然后, 得到滤波反投影的重建图像 $G_{FB}(x, y)$:

$$G_{FB}(x, y) = \sum_{i=1}^m h(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i, \theta_i) \Delta \theta \quad (4)$$

式中, m 是投影的总个数, θ_i 是表示第 i 个投影角度, $\Delta \theta$ 是指相邻两个投影之间的角度间隔。与透射层析成像不同, 光学反射层析的成像目标是半透光样品, 每个角度包含的特征各不相同, 因此需要采集完整的 $0 \sim 2\pi$ 范围内的信息才能正确重建目标。为了评估 ORT 测量的前房角度数的准确性, 使用下式进行衡量:

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{OCT_i} - \theta_{ORT_i})^2 \quad (5)$$

式中, M_{SE} 表示均方误差, n 为数据的总个数。 θ_{OCT_i} 为 OCT 测量的前房角度数, θ_{ORT_i} 为 ORT 测量的前房角度数, 将 θ_{OCT_i} 作为真实值, 计算其与 θ_{ORT_i} 的均方误差。

2 结果与讨论

光学反射投影数据处理流程如图 2 所示, 图 2a 为相机采集到的反射投影数据, 图中显示了猪眼的整体轮廓以及前房角的细节信息。采集 $0 \sim 2\pi$ 的反射投影数据后, 进行数据处理。使用上述的滤波反投影算法处理后得到图 2b 的一系列二维切片数据, 这些二维切片数据实质上是三维结构图像的横向切片图, 将这些二维横向切片图进行重叠就可以得到完整的三维结构图像。图 2c 的三维结构图像反应了猪眼的结构信息, 在前房角部位有明显的轮廓线。通过选定一个三维切片方向 φ , 可以获取该切片方向的三维切片图并进行前房角度数的测量 (图 2d)。三维切片方向 φ 前房角为 50.73° 。通过改变三维切片方向, 重复上述操作可获得不同位置的前房角度数, 直至得到整个猪眼的三维前房角度数, 实现全场的前房角测量。

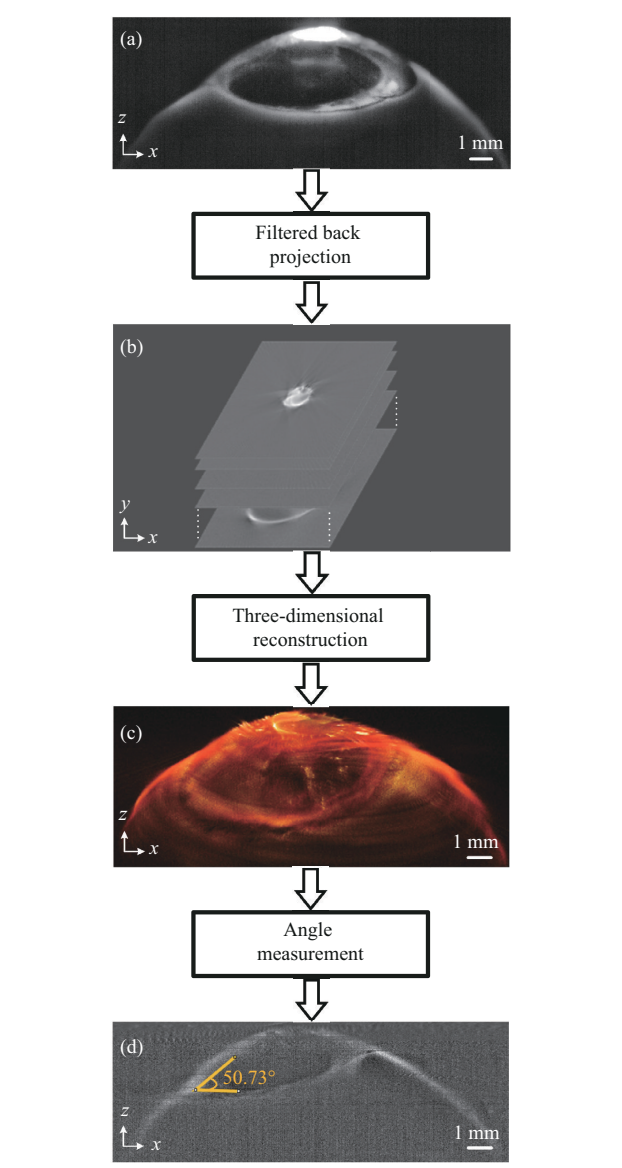


Fig. 2 Optical reflection projection data processing flow
(a) Reflection projection data. (b) Two-dimensional slice data.
(c) Three-dimensional structural image. (d) Anterior chamber angle measurement diagram.

图3展示了猪眼的实物图与三维结构图像。三维结构图像是对原始数据进行滤波反射层析算法处

理得出的,反映了猪眼的形状结构,为实现全场前房角的测量提供了基础。实物图中存在明显的结构分层(图3a)。为了更好地区分猪眼的各个结构层次,图中从外到内标有蓝、绿、黄三种颜色的虚线框。其中蓝色虚线框与绿色虚线框之间的部位为巩膜,即猪眼外围的白色纤维膜^[36]。绿色虚线框与黄色虚线框之间的部位为虹膜,而虹膜与角膜之间的交界处为本文的主要观察对象——前房角。前房角由角膜后表面与其对面的周边虹膜组成^[13]。黄色虚线框内的部位为瞳孔,部分白光会直接进入瞳孔,使巩膜处会出现亮点。图3b为ORT对猪眼进行三维结构成像的结果,其结构与实物图一一对应,清晰展示了巩膜和虹膜等重要结构。这些结构的准确定位为后续的前房角测量提供了方便。ORT具备非侵入、无损伤、成本低和成像分辨率高等优势,为其在眼科领域中的广泛应用提供了支持。

本文提出了一种基于ORT技术的三维前房角测量方法,可以重建猪眼的三维结构图像,并获得整个猪眼的三维前房角度数。猪眼的全场前房角度数测量结果如图4所示。图4a为猪眼的全场前房角度数分布图,不同的颜色对应不同的度数。为了验证前房角度数的准确性,在进行ORT后,使用频域OCT系统(Thorlabs, TEL320C1)对猪眼进行扫描,采集眼前节的OCT数据。OCT系统的光源中心波长为1 300 nm,穿透深度为3.5 mm,空气中轴向分辨率为5.5 μm,横向分辨率为13 μm。为了验证测量的准确性,本文对ORT与OCT的测量结果进行对比分析。猪眼的虹膜直径约为14.41 mm,TEL320C1型号OCT系统的最大横向扫描距离为13.5 mm,横向扫描距离小于样品直径,无法对猪眼进行全场成像。而ORT系统能够通过旋转来获取每个角度的前房角截面信息,最终通过滤波反射层析算法将这些截面信息重建成完整的三维前房角信息。在猪眼三维结构图像的俯视图

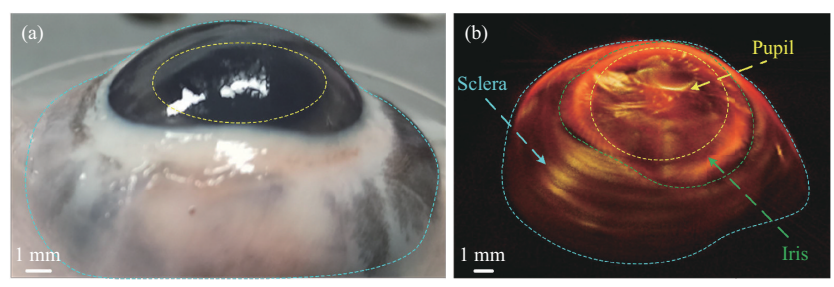


Fig. 3 Physical map and three-dimensional structural image of porcine eye
(a) Physical map of porcine eye. (b) Three-dimensional structural image of porcine eye.

(图4b)中选取测量了8个前房角度数。为了确保ORT和OCT测量的前房角是同一位置,实验中采用了虹膜特征和8个切片方向的物理标记进行精确对齐。同时,利用OCT的高分辨率和精确的横向导航能力来细致选择相同的虹膜直径截面,并在每次扫描后进行细致的图像比对。其中,图4c为ORT在三维切片方向F处的前房角测量示意图,测得前房角为45.22°。图4d为OCT在物理上对应图4c位置的前房角测量示意图,结果显示,测量得出的前房角为45.13°,图中蓝色箭头所指的白线为

OCT扫描得到的角膜共轭像。在三维切片方向F处,ORT和OCT测量出的前房角度数差值为0.09°,表明使用ORT测量前房角度数是可行的。图4e列出了ORT与OCT在8个对应位置的前房角度数测量值。并且两者测量结果的平均差值为0.51°,均方误差 M_{SE} 为0.317。根据实验结果可知,使用ORT测量前房角与OCT的结果具有一致性,且在多个三维切片方向均成立。TEL320C1型号OCT系统无法实现全场的前房角测量,而本文提出的方法能够实现猪眼的全场成像。

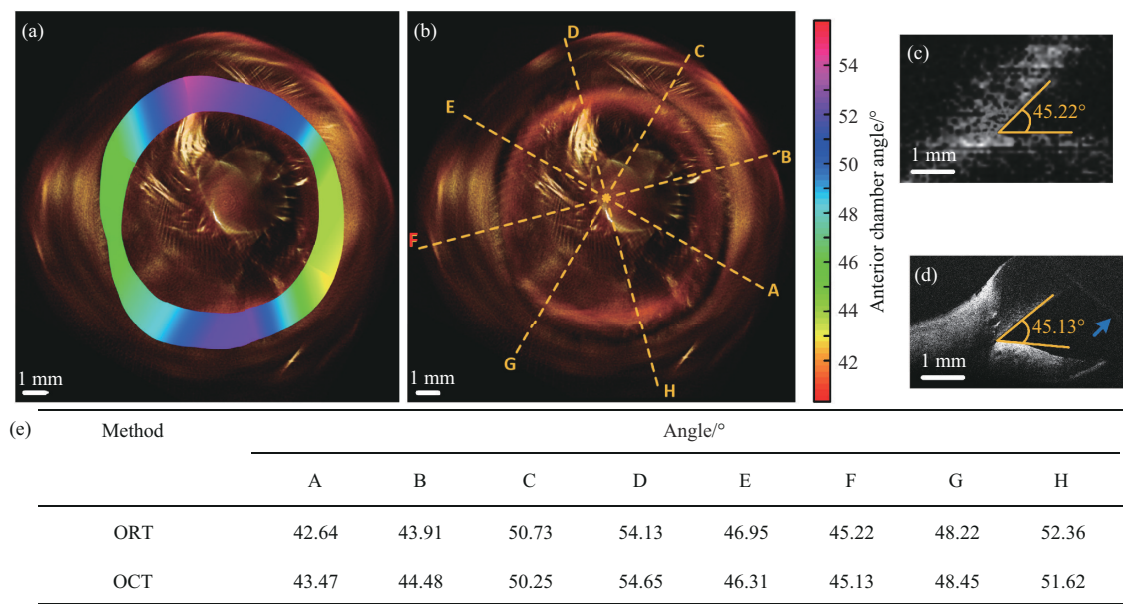


Fig. 4 Full-field anterior chamber angle measurements of porcine eye

(a) Distribution map of anterior chamber angles throughout the field. (b) Choice of 3D slice orientation. (c) Anterior chamber angle measurement results of ORT in the three-dimensional slice direction F. (d) OCT measurements of the anterior chamber angle in the three-dimensional slice direction F. (e) Table of anterior chamber angles measured by ORT and OCT.

本文使用ORT实现了猪眼的全场前房角测量。使用CMOS相机、远心系统、电机、白光光源等器件搭建了ORT系统,在实验中采集了猪眼在0~2 π 范围内的反射投影信息。本方法使用了白光照明,相对于激光反射层析成像(laser reflection tomography, LRT)方法,能避免激光对眼睛造成的损伤。利用偏振能有效消除强反光点,可在远心系统前增加偏振镜,实现消除猪眼表面反光的作用^[37]。对光学反射投影数据进行了滤波反投影处理,得到了猪眼的三维结构图像。通过与实物图的对比,证明了ORT能准确地重建出猪眼的三维结构图像。使用ORT重建出猪眼三维结构后,可以

测量出猪眼任意方位的前房角度数,实现了全场前房角测量。相较于其他的前房角检查技术,例如裂隙灯前房角镜检查、水前房角镜检查和UBM,ORT的非侵入性和无损伤性为其主要优势。与UBM和AS-OCT相比,ORT在成本效益上显示出明显的优势,为广泛的眼科诊断提供了可能性。目前ORT在眼部微结构成像不如AS-OCT精细,并且尚未能够在活体人眼上进行验证。在本文实验中使用的TEL320C1型号OCT系统,由于最大横向扫描距离的限制,无法实现对猪眼的全场成像,而本文提出的方法可以实现猪眼的全场测量。在未来的发展中,ORT技术可以通过改进成像系统和成像

算法来提高对眼部微结构的分辨率和精确度。此外, ORT 技术在活体人眼上的应用, 将是一个重要的研究方向。在推动这项技术向临床应用转化的过程中面临的挑战包括: 改进成像系统以适应活体眼球的动态变化, 提高成像速度以提升患者舒适度, 以及开发更高分辨率的成像算法。本研究通过分析 ORT 和 OCT 的测量结果, 证明了使用 ORT 可实现测量猪眼的全场前房角。ORT 成像系统具有非侵入、无损伤、成本低和成像分辨率高的特点, 适合对眼睛进行成像, 可惠及偏远地区的诊所和小医院。

3 结 论

本研究使用一种新的光学三维成像技术对猪眼进行全场的前房角测量, 成功实现了猪眼的三维结构成像, 同时使用全场前房角度数分布图展示了猪眼的全场前房角测量结果。自主搭建的 ORT 系统使用白光能减少对眼睛的损伤, 具有成本低和成像分辨率高的优点, 可惠及偏远地区的诊所和小医院。对原始数据进行滤波反射层析算法处理可获得猪眼的三维结构图像, 重建得出的三维结构图像与实物图在结构上能彼此对应, 表明使用 ORT 可对猪眼进行三维结构成像。使用 TEL320C1 型号 OCT 系统的测量结果作为参考, 结果显示, 两种方法的平均差值为 0.51° , 均方误差 M_{se} 为 0.317, 证明了本文方法的可靠性。本文基于 ORT 技术实现了猪眼的三维结构成像和全场前房角测量, 为闭角型青光眼的诊断提供一种新思路和新方法, 对眼睛相关疾病的筛查、诊断和监测具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] You M, Rong R, Zeng Z, *et al.* Transneuronal degeneration in the brain during glaucoma. *Front Aging Neurosci*, 2021, **13**: 643685
- [2] Van Hook M J. Influences of glaucoma on the structure and function of synapses in the visual system. *Antioxid Redox Signal*, 2022, **37**(10-12): 842-861
- [3] Stepp M A, Menko A S. Immune responses to injury and their links to eye disease. *Transl Res*, 2021, **236**: 52-71
- [4] Cen L P, Park K K, So K F. Optic nerve diseases and regeneration: how far are we from the promised land?. *Clin Exp Ophthalmol*, 2023, **51**(6): 627-641
- [5] Anandi L, Ramadhanti S Y, Yoserizal M. Importance of early detection of acute angle closure glaucoma: a case report. *Ophthalmol Ina*, 2022, **48**(1): 121-129
- [6] Choi H, Kim T, Kim S J, *et al.* Predicting postoperative anterior chamber angle for phakic intraocular lens implantation using preoperative anterior segment metrics. *Transl Vis Sci Technol*, 2023, **12**(1): 10
- [7] Dabasia P L, Edgar D F, Murdoch I E, *et al.* Noncontact screening methods for the detection of narrow anterior chamber angles. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, **56**(6): 3929-3935
- [8] Nüßle S, Reinhard T, Lübke J. Acute closed-angle glaucoma—an ophthalmological emergency. *Dtsch Arztebl Int*, 2021, **118**(45): 771
- [9] Quigley H A, Broman A T. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *Br J Ophthalmol*, 2006, **90**(3): 262-267
- [10] Jay J, Kumar V, Bidkhanian P, *et al.* Neuropsychiatric disturbance in huntington's disease: approach to management. *Eur Psychiatry*, 2022, **65**(S1): S475-S476
- [11] Kurysheva N I, Lepeshkina L V. Detection of primary angle closure glaucoma progression by optical coherence tomography. *J Glaucoma*, 2021, **30**(5): 410-420
- [12] Thylefors B, Negrel A D. The global impact of glaucoma. *Bull World Health Organ*, 1994, **72**(3): 323
- [13] Amini R, Barocas V H. Reverse pupillary block slows iris contour recovery from corneoscleral indentation. *J Biomech Eng*, 2010, **132**(7): 071010
- [14] Fu H, Xu Y, Lin S, *et al.* Segmentation and quantification for angle-closure glaucoma assessment in anterior segment OCT. *IEEE Trans Med Imaging*, 2017, **36**(9): 1930-1938
- [15] Ghadamzadeh M, Karimi F, Moghaddam S G, *et al.* Anterior chamber angle changes in primary angle-closure glaucoma following phacoemulsification versus phacotrabeculectomy: a prospective randomized clinical trial. *J Glaucoma*, 2022, **31**(3): 147-155
- [16] Qu J, Tian Z, Li X, *et al.* Anterior segment pars plana vitrectomy combined with posterior capsulorhexis, phacoemulsification and trabeculectomy in treatment of medically uncontrolled acute primary angle-closure glaucoma: a retrospective study. *Medicine*, 2022, **101**(40): e30946
- [17] Xu Y, Tan Q, Li C, *et al.* The ocular biometry characteristics of young patients with primary angle-closure glaucoma. *BMC Ophthalmol*, 2022, **22**(1): 150
- [18] Chen D, Ho Y, Sasa Y, *et al.* Machine learning-guided prediction of central anterior chamber depth using slit lamp images from a portable smartphone device. *Biosensors*, 2021, **11**(6): 182
- [19] Cronin T, Gupta A, Armstrong G W, *et al.* Remote assessment of anterior chamber depth using novel stereoscopic digital slit lamp images. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2022, **63**(7): 1404-A0100
- [20] Shimizu E, Yazu H, Aketa N, *et al.* A study validating the estimation of anterior chamber depth and iridocorneal angle with portable and non-portable slit-lamp microscopy. *Sensors*, 2021, **21**(4): 1436
- [21] Chiam N, Perara S. Water gonioscopy: a technique for intraoperative visualization of the anterior chamber angle. *J Curr Glaucoma Pract*, 2021, **15**(3): 106
- [22] Jinadu F O, Jolaoso I A, Balogun M, *et al.* Ultrasonic ocular

- dimensions and anthropometry in normal and myopic eyes: a case-control study. *Expert Rev Ophthalmol*, 2022, **17**(5): 343-351
- [23] Zhu Y, Fang L, Oatts J, *et al.* Use of ultrasound biomicroscopy to predict the outcome of anterior segment reconstruction in congenital fibrovascular pupillary membrane with secondary glaucoma. *Br J Ophthalmol*, 2024, **108**(1): 65-70
- [24] Bu Q, Hu D, Zhu H, *et al.* Swept-source optical coherence tomography and ultrasound biomicroscopy study of anterior segment parameters in primary angle-closure glaucoma. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2023, **261**(6): 1651-1658
- [25] Yu Z, Wang F, Dong F, *et al.* Comparison of ocular morphological parameters related to lens position by anterior segment optical coherence tomography and ultrasound biomicroscopy. *Int J Clin Pract Suppl*, 2022, **2022**: e7599631
- [26] Liu J, Yan S, Lu N, *et al.* Automatic segmentation of foveal avascular zone based on adaptive watershed algorithm in retinal optical coherence tomography angiography images. *J Innov Opt Health Sci*, 2022, **15**(01): 2242001
- [27] Liu J, Yan S, Lu N, *et al.* Automated retinal boundary segmentation of optical coherence tomography images using an improved Canny operator. *Sci Rep*, 2022, **12**(1): 1412
- [28] Fu H, Baskaran M, Xu Y, *et al.* A deep learning system for automated angle-closure detection in anterior segment optical coherence tomography images. *Am J Ophthalmol*, 2019, **203**: 37-45
- [29] Hood D C, La Bruna S, Tsamis E, *et al.* Detecting glaucoma with only OCT: implications for the clinic, research, screening, and AI development. *Prog Retin Eye Res*, 2022, **90**: 101052
- [30] Xu B Y, Chiang M, Chaudhary S, *et al.* Deep learning classifiers for automated detection of gonioscopic angle closure based on anterior segment OCT images. *Am J Ophthalmol*, 2019, **208**: 273-280
- [31] Hao H, Zhao Y, Yan Q, *et al.* Angle-closure assessment in anterior segment OCT images *via* deep learning. *Med Image Anal*, 2021, **69**: 101956
- [32] Li J, Zhou N, Sun J, *et al.* Transport of intensity diffraction tomography with non-interferometric synthetic aperture for three-dimensional label-free microscopy. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 154
- [33] Sharpe J, Ahlgren U, Perry P, *et al.* Optical projection tomography as a tool for 3D microscopy and gene expression studies. *Science*, 2002, **296**(5567): 541-545
- [34] Tan Y, Tey H L, Chong S Z, *et al.* Skin-ny deeping: uncovering immune cell behavior and function through imaging techniques. *Immunol Rev*, 2022, **306**(1): 271-292
- [35] 林放. 基于激光反射断层成像的目标探测研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2017
- Lin F. Research on Target Detection Based on Laser Reflection Tomography[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017
- [36] Watson P G, Young R D. Scleral structure, organisation and disease. A review. *Exp Eye Res*, 2004, **78**(3): 609-623
- [37] Nayar S K, Fang X S, Boulton T. Separation of reflection components using color and polarization. *Int J Comput Vis*, 1997, **21**(3): 163-186

Full-field Anterior Chamber Angle Measurement Based on Optical Reflection Tomography*

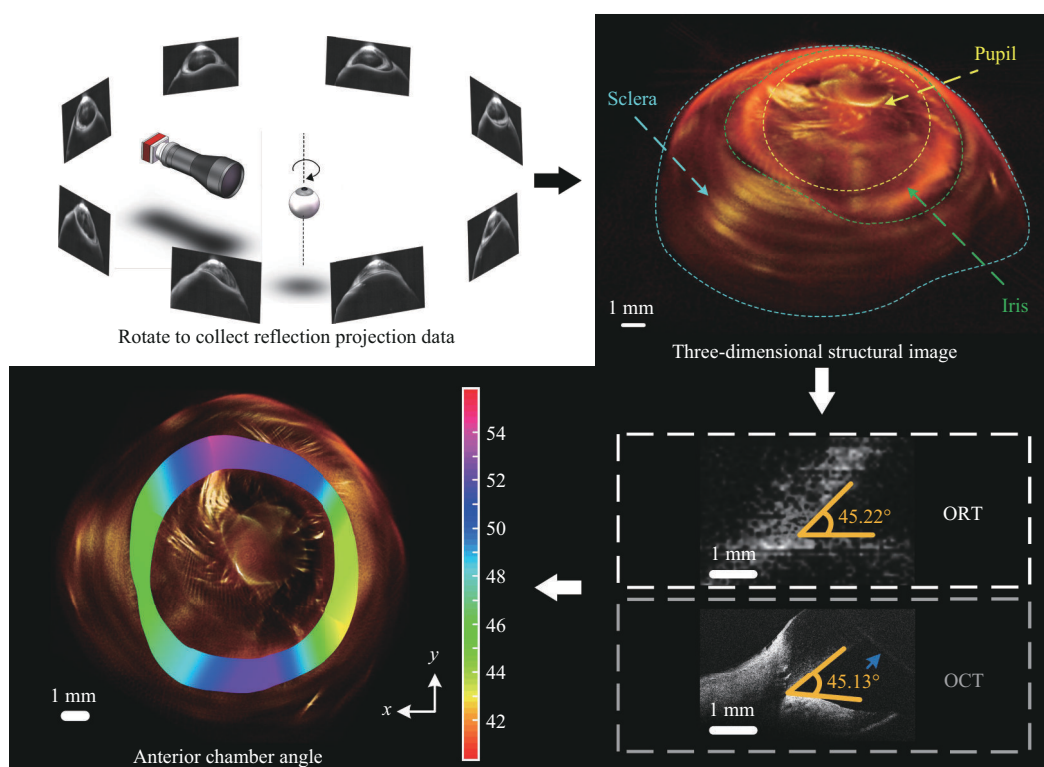
LIU Bi-Wang^{1,2)}, ZHONG Jun-Ping^{1)**}, LIN Hai-Na¹⁾, ZENG Ya-Guang^{1)**}, YU You-Ping¹⁾,
LI Hong-Yi¹⁾, HAN Ding-An¹⁾, CHEN Jin-Ying^{3)**}

⁽¹⁾Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China;

⁽²⁾School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China;

⁽³⁾Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Graphical abstract



* This work was supported by grants from Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2020B1111040001), The National Natural Science Foundation of China (61705036, 61771139, 61805038), Science and Technology Projects in Guangzhou (202201010618), Medical Scientific Research Foundation of Guangdong Province of China (A2022415), Fundamental Research Funds for the Central Universities (21621052), and Research Fund of Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent MicroNano Optoelectronic Technology (2020B1212030010).

** Corresponding author.

ZHONG Jun-Ping. Tel: 86-13268286089, E-mail: zjp85@126.com

ZENG Ya-Guang. Tel: 86-13590668561, E-mail: zeng.yg@163.com

CHEN Jin-Ying. Tel: 86-15017541741, E-mail: chenjy0907@126.com

Received: December 7, 2023 Accepted: March 22, 2024

Abstract Objective Angle-closure glaucoma (ACG) is one of the major eye-blinding diseases. To diagnose ACG, it is crucial to examine the anterior chamber angle. Current diagnostic tools include slit lamp gonioscopy, water gonioscopy, ultrasound biomicroscopy (UBM), and anterior segment optical coherence tomography (AS-OCT). Slit lamp and water gonioscopy allow convenient observation of the anterior chamber angle, but pose risks of invasive operation and eye infections. UBM can accurately measure the structure of the anterior chamber angle. However, it is complex to operate and unsuitable for patients, who have undergone trauma or ocular surgery. Although AS-OCT provides detailed images, it is costly. The aim of this study is to explore a non-invasive, non-destructive optical reflection tomography (ORT) technique. This technique can achieve low-cost three-dimensional imaging and full-field anterior chamber angle measurement of the porcine eye. **Methods** The experiment involved assembling an optical reflection tomography system, which included a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) camera, a telecentric system, a stepper motor, and a white light source, achieving a spatial resolution of approximately 8.5 μm . The process required positioning the porcine eye at the center of the field of the imaging system and rotating it around its central axis using a stepper motor. Reflection projection images were captured at each angle with an exposure time of 1.0 ms and an interval of 2° . The collected reflection-projection data were processed using a filtered reflection tomography algorithm, generating a series of two-dimensional slice data. These slices essentially represented cross-sectional views of the three-dimensional structural image, and were reconstructed into a complete three-dimensional structural image. Based on the reconstructed three-dimensional structural image of the porcine eye, the anterior chamber angles at different positions were measured, and a distribution map of these angles was drawn. Simultaneously, the ORT measurements were compared with the standard results obtained from optical coherence tomography (OCT) to assess the accuracy of ORT measurements. **Results** In this study, we successfully obtained the reflection projection data of a porcine eye using ORT technology, reconstructed its three-dimensional structural image, and measured the anterior chamber angle, generating the corresponding distribution map. To better distinguish the different structural parts of porcine eye, the three-dimensional structural image was marked with blue, green, and yellow dashed lines from the outer to the inner layers. The area between the blue and green dashed lines corresponded to the sclera. The area between the green and yellow dashed lines corresponded to the iris. The area inside the yellow dashed line corresponded to the pupil. The three-dimensional structural image clearly revealed the key anatomical features of the porcine eye. It was able to measure the anterior chamber angle at different positions. Additionally, the anterior chamber angle measurements of the porcine eye using ORT were compared with the measurements obtained using a TEL320C1 type OCT system, showing an average deviation of 0.51° and a mean square error M_{SE} of 0.317. **Conclusion** ORT is a non-invasive, non-destructive, low-cost, and high-resolution imaging technique capable of achieving three-dimensional structural imaging and full-field anterior chamber angle measurement of a porcine eye. This technology offers a new perspective for the diagnosis of angle-closure glaucoma and is significant for the screening, diagnosis, and monitoring of eye diseases, potentially benefiting clinics and small hospitals in remote areas in the future.

Key words angle-closure glaucoma, full-field anterior chamber angle, optical reflection tomography

DOI: 10.16476/j.pibb.2023.0480