

· 实验研究 ·

眼科悬臂手持式 OCT 的多场景成像稳定性评价

段铮昱¹ 李嘉雄¹ 骆仲舟¹ 张金泽¹ 黄远聪¹ 袁进² 肖鹏¹¹中山大学中山眼科中心 眼病防治全国重点实验室 广东省眼科视觉科学重点实验室, 广州 510060; ²首都医科大学附属北京同仁医院眼科, 北京 100730

通信作者: 肖鹏, Email: xiaopeng@gzzoc.com

【摘要】 目的 评估悬臂手持式超高分辨率光学相干断层扫描 (OCT) 在多场景使用的稳定性。**方法** 利用悬臂手持式 OCT 的悬臂支撑模式及手持模式和台式 OCT 设备分别对中山大学中山眼科中心体检的健康成年受检者 3 名和 OEMI-7 模型眼进行坐位三维扫描成像, 并利用悬臂手持式 OCT 的悬臂支撑模式及手持模式对 4 名清醒婴幼儿、2 名镇静婴幼儿 (口服水合氯醛) 和 4 名健康成年人进行仰卧位三维扫描成像。采用相邻 B-scan 之间关联性分析方法对三维成像数据进行处理, 计算 B-scan 在深度轴向 (z 轴) 与快轴横向 (x 轴) 的偏移量。**结果** 与手持模式相比, 悬臂辅助模式对模型眼成像深度轴向运动偏移量从 $(24.00 \pm 1.00) \mu\text{m}$ 降至 $(2.67 \pm 0.57) \mu\text{m}$, 快轴横向运动偏移量从 $(124.00 \pm 12.49) \mu\text{m}$ 降至 $(48.00 \pm 15.87) \mu\text{m}$, 差异均有统计学意义 ($t = 2.932, 4.337$, 均 $P < 0.001$)。在活体人眼与模型眼坐位状态测试中, 悬臂辅助模式深度轴向和快轴横向运动偏移量较传统手持模式明显降低, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$), 悬臂辅助模式与台式 OCT 各轴向运动偏移量相当, 差异无统计学意义 (均 $P > 0.05$)。悬臂手持式系统检测仰卧位镇静状态和清醒状态的婴幼儿受检者轴向偏移量与健康成年人相当, 总体比较差异无统计学意义 ($P = 0.385$), 横向方向偏移量均高于健康成年人, 差异有统计学意义 (均 $P = 0.013$)。镇静与清醒状态下婴幼儿轴向运动偏移量比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 清醒状态婴幼儿横向运动偏移量高于镇静状态婴幼儿, 但差异无统计学意义 ($P = 0.247$)。**结论** 悬臂手持式 OCT 在保持高速、高分辨率成像性能同时, 可实现与传统台式 OCT 相当的成像操作稳定性, 适合仰卧位受检者的床旁成像, 尤其是不配合的婴幼儿受检者, 具有良好的临床应用前景。

【关键词】 光学相干断层扫描; 手持式光学相干断层扫描; 多场景成像; 成像稳定性**基金项目:** 广东省重点领域研发计划 (2025B1111080001); 广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515110451); 广州市基础研究计划 (2024A04J4476)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250630-00216

Imaging stability of the portable boom-type ophthalmic OCT in multiple application scenarios

Duan Zhengyu¹, Li Jiaxiong¹, Luo Zhongzhou¹, Zhang Jinze¹, Huang Yuancong¹, Yuan Jin², Xiao Peng¹¹State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology Visual Science, Guangzhou 510060, China; ²Ophthalmology Department of Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100730, China

Corresponding author: Xiao Peng, Email: xiaopeng@gzzoc.com

[Abstract] Objective To evaluate the imaging stability of a portable boom-type ophthalmic ultra-high-resolution optical coherence tomography (OCT) device in multiple application scenarios. **Methods** The boom-type mode and handheld mode of the portable boom-type OCT and the desktop OCT were used to perform three-dimensional imaging tests on three healthy adults undergoing physical examinations at the Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University as well as on OEMI-7 model eyes in a sitting position. The same two modes of the portable boom-type OCT were used to perform three-dimensional imaging on four awake non-sedated infants, two sedated infants and four healthy adults in the supine position. The obtained 3D imaging data were processed using a correlation analysis method between adjacent B-scans, and the offset of B-scan in the axial (z-axis) and the fast axis transverse (x-axis) were calculated. The procedures for *in vivo* human eye experiments followed the Declaration of Helsinki and were approved by the Ethics Committee of Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University (No. 2020 KYPJ154). All subjects and infant guardians signed the informed consent form. **Results** Compared with the handheld imaging mode, the

axial and fast axis lateral motion offsets of the model eye were significantly reduced in the boom-type imaging mode from $(124.00 \pm 12.49) \mu\text{m}$ to $(48.00 \pm 15.87) \mu\text{m}$ and from $(24.00 \pm 1.00) \mu\text{m}$ to $(2.67 \pm 0.57) \mu\text{m}$, respectively ($t=2.932, 4.337$; both $P<0.001$). In both human and model eyes, the axial and fast axis lateral motion offsets of the boom-type mode were significantly lower than in the traditional handheld operation mode (both $P<0.001$). The axial and lateral motion offsets between the boom-type mode and desk-top OCT imaging were comparable, without significant differences (both $P>0.05$). In both sedated and awake, non-sedated infants in the supine position, the axial offset of the portable boom-type OCT system was similar to that of the healthy adults, without significant difference in the overall comparison ($P=0.385$), and the lateral offsets were higher than those of healthy adults, with statistically significant differences (both $P=0.013$). There was no significant difference in axial deviation between sedated and non-sedated infants ($P>0.05$). The lateral deviation of non-sedated infants was higher than that of sedated infants, though the difference was not statistically significant ($P=0.247$). **Conclusions** The portable boom-type OCT system can maintain high-speed, high-resolution imaging performance while achieving imaging stability comparable to traditional desktop OCT systems. It is more suitable for bedside imaging of supine subjects, especially uncooperative infants, and has good clinical application prospects.

[Key words] Optical coherence tomography; Handheld optical coherence tomography; Multiple application scenarios; Imaging stability

Fund program: Guangdong Key Research and Development Program (2025B1111080001); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2023A1515110451); Guangzhou Basic Research Program (2024A04J4476)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250630-00216

人眼球由一系列透明结构组成,其中眼前节和后节均有许多微米厚度的层状结构,是基于光学探测原理成像技术的理想靶器官^[1-2]。光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)成像技术以其三维高分辨率、非接触式、非侵入式的成像特点,在眼科疾病的影像诊断方面具有极大的优势,被作为多种眼科疾病诊断的金标准^[3-5]。目前眼科临床大多数商业化的 OCT 设备是针对成年人坐位检查设计,需要受检者以坐位状态配合才能完成检查^[6-7]。然而,这些台式 OCT 设备及其成像操作流程不适用于配合度低的婴幼儿和仰卧位受检者。视网膜疾病,如早产儿视网膜病变和年龄相关性黄斑变性分别是导致婴幼儿^[8-9]和老年人视力损害的重要原因^[10-11]。在视网膜疾病的早期和进展过程中,视网膜可能发生几微米的细微变化^[12-13]。高分辨率视网膜成像可提供详细的结构和功能信息,对视网膜疾病的早期诊断和防盲至关重要。安装有 Flex 模块 OCT 的德国 Heidelberg Spectralis 通过悬臂辅助,可用于仰卧位受检者,但该设备笨重,操作复杂,一般仅用于可配合检查的成年人,和麻醉或镇静状态下的婴幼儿,难以用于清醒状态下的婴幼儿,或保温箱内的早产儿、婴幼儿的眼病筛查^[14-15]。商用化的德国手持 OCT 系统 Envisu C-Class 可用于仰卧位及婴幼儿眼底成像,但其手持式探头重达 1.5 kg,人机功效较差,且其 A-scan 扫描速率相对较低(32 kHz),导致图像采集过程中会引入较多的运动伪影,难以获取高质量的三维 OCT 图像^[16-18]。本

课题组设计了一种具有轻量化、手持式成像探头的多功能悬臂手持式超高分辨率 OCT 系统(发明专利号:ZL202111189350.3;实用新型专利号:ZL202122462309.0),其采用悬臂支架辅助,可进行灵活稳定的手持式成像操作^[19]。本研究拟通过 OCT 三维扫描图像数据组中相邻 B-scan 影像间关联性分析对该 OCT 成像系统进行稳定性评价,提取出由外部干扰及人体自身眼动等因素引入的 OCT 影像相对位移值,并与台式 OCT 设备进行量化对比分析,探索该系统在手持、悬臂辅助等多操作模式及卧位、坐位模式下的稳定性。

1 材料与方法

1.1 成像装置及操作模式

悬臂手持式 OCT 基于超高分辨率 OCT 系统原理开发^[19]。手持式探头设计采用基于二维振镜设计的激光扫描系统(图 1A),具有自动对焦及扫描位置实时引导功能。整套 OCT 系统集成设计在医疗推车上,确保系统易于移动,以适应护理、床边成像等不同场景(图 1B)。为增强手持式 OCT 探头操作的稳定性,在系统中加装多自由度机械臂辅助支撑固定,以实现无支撑手持操作或悬臂支架辅助操作。根据受检者的身体情况及配合度,可以实现 OCT 系统的坐位或卧位成像扫描。

系统成像过程中,操作者可借助悬臂支架辅助将探头调节至扫描区域,通过调节支架固定在适合的角度自动锁止悬停,再手持 OCT 探头微调扫描区域及目

标聚焦;也可将探头从悬臂支架取下,直接握持探头进行扫描区域搜索及聚焦。操作者搜索扫描区域时,首先通过瞳孔相机确认瞳孔中心位于视窗的位置,以此引导手持式探头定位;待出现视网膜组织图像后,通过连续快速的三维扫描获取一组断层扫描图像数据并对其进行叠加,提供探头所在位置的 *en-face* 眼底平面预览图,结合瞳孔相机显示的瞳孔位置,可以适时调整扫描位置。通过观察 *en-face* 眼底预览图中视盘、黄斑及眼底大血管等关键信息,定位扫描区域,可实现实时的眼前、眼底预览,实时追踪探头扫描位置。

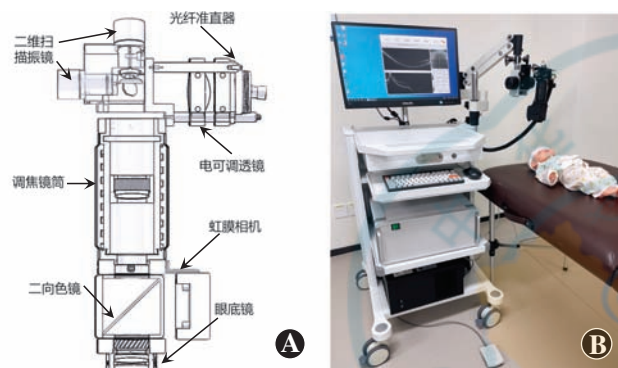


图1 悬臂手持式 OCT 探头设计及系统集成示意图 A: 探头主要元器件布局 B: 实物及婴幼儿卧位成像操作示意图

Figure 1 Schematic of the portable boom-type OCT probe and system assembly A: Main components layout of the probe B: Photo of the system and supine imaging demonstration of an infant model

1.2 实验对象

为验证悬臂手持式 OCT 系统的多场景成像性能及操作稳定性,本团队在中山大学中山眼科中心对 25~36 岁健康成年受检者 4 例 8 眼、出生 5 d~3 岁 11 个月镇静/清醒状态下健康婴幼儿 6 例 6 眼和模型眼靶(OEMI-7,美国 Ocular Instruments 公司)进行多场景成像实验。在体人眼成像实验采用 128×1 024 A-scan 的三维立方扫描模式,成人受检者分别采用台式 OCT 设备及悬臂手持式 OCT 设备,以坐位和仰卧位完成 3 次成像实验。清醒和镇静状态的婴幼儿受检者,采用悬臂手持式 OCT 设备,以仰卧位完成 3 次成像实验。实验由经过培训的操作人员完成,对于清醒状态下不能配合成像的婴幼儿,在专业医师指导下口服 10% 水合氯醛进行镇静。受检者 OCT 成像之前采用包括眼底照相、间接检眼镜检查在内的标准临床检查排除眼部疾病。在体人眼实验程序遵循《赫尔辛基宣言》,并获得中山大学中山眼科中心医学伦理委员会批准(批文号:2020KYPJ154),所有受检者及婴幼儿监护人均已签署知情同意书。

1.3 成像稳定性评价方法

一般手持式 OCT 成像装置,由于缺乏下颌托、固视系统等成像辅助装置,结合人体在清醒状态下,相对成像装置的头部、眼球自身微动等因素影响,相较于台式 OCT 检查设备会更容易产生成像伪影。眼球或者头部运动引起的运动伪影模型可以分为 3 个自由度(图 2A)。假设三维成像中,视网膜图像可以沿着组织深度方向(z 轴)和快轴横向扫描方向(x 轴)和慢轴扫描方向(y 轴)平移(图 2B)。其中,x 轴和 y 轴方向的运动,一般由眼球的漂移或者注视方向的变化引入,而 z 轴方向的运动一般由眼球自身的轴向运动或者患者与仪器的相对轴向运动引起。成像过程中上述运动干扰会造成 OCT 对视网膜的采样变成扭曲的采样格栅(图 2C)。在传统台式 OCT 三维成像中,图像采集的成功率和 *en-face* 图像中运动伪影所致条纹变形现象可用于评估设备成像性能及操作稳定性^[20-23]。本研究针对采集到的三维图像数据组,通过连续 B-scan 图像间横向和轴向自相关分析,定量计算快速扫描轴向上连续 B-scan 间相关性。

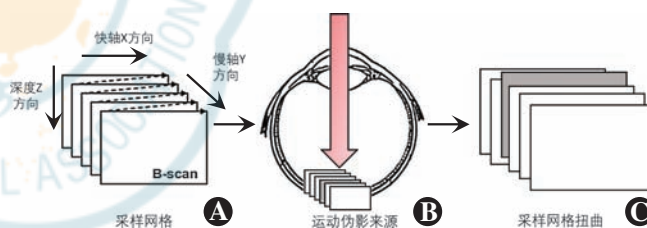


图2 OCT 三维成像中的运动伪影 A: OCT 三维采样网格的运动伪影自由度模型 B: 视网膜三维影像运动伪影来源示意图 C: 成像外部干扰造成的三维采样网格扭曲

Figure 2 Motion artifacts in OCT three-dimensional imaging A: The degree-of-freedom model of motion artifacts in the OCT three-dimensional imaging grid B: Schematic of the sources of motion artifacts in retinal three-dimensional images C: Distortion of the three-dimensional imaging grid caused by external interference during imaging

为评估连续 B-scan 之间的轴向和横向扭曲,通过记录一组 B-scan 帧的移位,并以每一帧作为下一帧的对齐模板;对齐完成后,可以导出该组三维扫描中连续 B-scan 间 x 轴和 z 轴方向的位移量^[20]。对于运动导致的轴向位移,采用关联分析法评估第 j 帧和第(j+1)帧中第 i 条 A-scan 之间的关联性^[24],计算公式: $\chi_i(z') = \Gamma[I_{i,j+1}, I_{i,j}](z')$ 。其中 χ 为互相关函数, Γ 为相关运算, $I_{i,j}$ 为第 j 帧的第 i 条 A-scan 强度曲线。每个 $\chi_i(z')$ 的最大峰位置表示轴向偏移。当 $\chi_i(z')$ 的最大相关性小于最大相关性的平均值时,即 $1/N \sum_{i=0}^{n-1} \max[\chi_i(z')]$, 则 $\chi_i(z')$ 被舍弃。第 j 帧和 (j+1) 帧之间的

轴向位移确定为每个 χ 中最大位置的中值。

根据相关系数计算 B-scan 在轴向(z 轴)与快轴横向(x 轴)的最大峰-峰值,即偏移量,计算公式:

$$\gamma(u,v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u,y-v) - \bar{t}]^2}{\{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u,y-v) - \bar{t}]^2\}^{0.5}} \quad [25]$$

其中, f 代表 B-scan 图像在特征窗口下对 (x,y) 进行求和, t 代表在 (u,v) 处的特征值, $\bar{t}$ 代表特征均值, $\bar{f}_{u,v}$ 是 $f(x,y)$ 在特征区域的均值。

分别以手持模式和悬臂辅助模式,对桌面固定放置的模型眼靶各进行 3 次成像测试,计算深度轴向(z 轴)与快轴横向(x 轴)平均运动偏移量。分别采用悬臂手持式 OCT 系统的悬臂辅助模式、手持模式和本团队前期研发的传统台式 OCT 设备^[26]对 3 名健康成年人 and 模型眼进行成像稳定性比较,成像过程中受检者均采用坐位,配合下颌托支架并通过外部固视装置引导受检者固视方向;拍摄模型眼时,将模型眼固定在裂隙灯显微镜的头部支架上,模拟成年人坐位的眼球位置及拍摄角度。在临床检查条件下,对 4 名清醒婴幼儿、2 名镇静婴幼儿和 4 名健康成人进行仰卧位三维扫描成。成像过程中,受检者均呈仰卧位,无额外的头部固定及固视装置。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 25.0 统计学软件进行统计分析。连续变量数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验证实符合正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,不同 OCT 模式下深度轴向(z 轴)和快轴横向(x 轴)运动偏移量比较采用配对 t 检验;不同 OCT 类型各轴向运动偏移量比较采用单因素方差分析,并采用 Bonferroni 事后检验校正所有 P 值。采用双尾检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 在体人眼成像实验结果

悬臂手持式 OCT 系统成功获取的 1 名受检者 OCT 影像结果显示视网膜结构正常,中央凹凹陷良好,视网膜主要层结构清晰(图 3A~C)。相邻 B-scan 图像之间横向和轴向自相关分析结果显示,眼

动等因素干扰 B-scan 图像沿着横向及轴向发生相对位移(图 3D、E)。

2.2 成像稳定性评价结果

2.2.1 悬臂手持式系统不同模式下模型眼成像稳定性比较 与手持模式相比,悬臂辅助模式对模型眼成像深度轴向和快轴横向运动偏移量明显降低,差异均有统计学意义($t = 2.932, 4.337$, 均 $P < 0.001$) (表 1)。

2.2.2 悬臂手持式系统坐位场景成像稳定性比较 在悬臂辅助模式下,健康成年人与模型眼成像的深度轴向和快轴横向运动偏移量相当,均低于手持模式,差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$);悬臂辅助模式与台式 OCT 对健康成年人与模型眼成像的轴向和横向运动偏移量相接近(均 $P > 0.05$) (表 2、3)。

2.2.3 悬臂手持式系统仰卧场景成像稳定性比较 悬臂手持式系统检测仰卧位受检者运动偏移量时,健康成年人、镇静状态婴幼儿、清醒状态婴幼儿深度轴向运动偏移量总体比较差异无统计学意义($F = 1.097$, $P = 0.385$),快轴横向运动偏移量总体比较差异有统计学意义($F = 8.542$, $P = 0.013$)。其中镇静和清醒状态

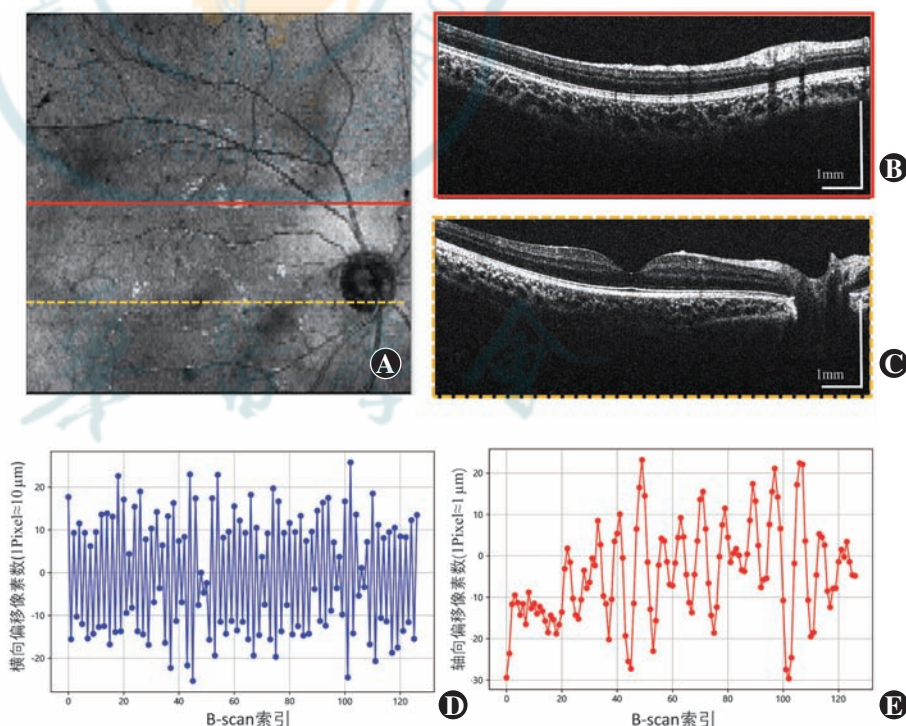


图3 受检者眼底成像测试结果 A:OCT 三维影像 en-face 强度投影图像 B、C:en-face 图像对应位置的断层影像 D:三维影像相邻 B-scan 间快轴横向(x 轴方向)位移偏移量(像素数) E:三维影像相邻 B-scan 间深度轴向(z 轴)位移偏移量(像素数)

Figure 3 Fundus imaging result of a subject A:OCT three-dimensional en-face intensity projection image B,C:Cross-sectional images at the corresponding positions of the en-face images D:Fast-axis lateral (x-axis direction) displacement offset in pixels between adjacent B-scans in three-dimensional image set E:Depth-axis (z-axis direction) displacement offset in pixels between adjacent B-scans in three-dimensional image set

下婴幼儿深度轴向运动偏移量与健康成年人相当,镇静和清醒状态下婴幼儿的深度轴向运动偏移量相当(均 $P>0.05$);镇静和清醒状态下婴幼儿快轴横向运动偏移量均高于健康成年人,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),清醒状态婴幼儿快轴横向运动偏移量高于镇静状态婴幼儿,但差异无统计学意义($P=0.247$)(表 4)。

表 1 悬臂手持 OCT 不同模式对模型眼成像深度轴向和快轴横向运动偏移量比较($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

Table 1 Comparison of axial and lateral offsets of handheld OCT in different imaging modes for the model eye ($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

OCT 模式	测量次数	深度轴向(z 轴)	快轴横向(x 轴)
悬臂辅助模式	3	2.67±0.57	48.00±15.87
手持模式	3	24.00±1.00	124.00±12.49
t 值		2.932	4.337
P 值		<0.001	<0.001

注:(配对 t 检验) OCT:光学相干断层扫描

Note:(Paired samples t-test) OCT:optical coherence tomography

表 2 不同成像模式间模型眼坐位成像深度轴向和快轴横向运动偏移量比较($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

Table 2 Comparison of axial and lateral offsets of sitting posture imaging in model eye by different model OCT ($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

OCT 模式	测量次数	深度轴向(z 轴)	快轴横向(x 轴)
台式 OCT	3	26.90±8.51 ^a	164.92±31.75 ^a
悬臂辅助模式	3	36.68±12.82 ^a	153.90±10.42 ^a
手持模式	3	80.64±22.98	287.94±95.30
F 值		7.883	18.586
P 值		0.005	<0.001

注:与手持模式比较,^a $P<0.001$ (单因素方差分析,Bonferroni 检验)

OCT:光学相干断层扫描

Note:Compared with hand-held imaging mode,^a $P<0.05$ (One-way ANOVA,Bonferroni test) OCT:optical coherence tomography

表 3 不同成像模式间健康受试者坐位成像深度轴向和快轴横向运动偏移量比较($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

Table 3 Comparison of axial and lateral offsets of sitting posture imaging in healthy adults by different model OCT ($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

OCT 模式	眼数	深度轴向(z 轴)	快轴横向(x 轴)
台式 OCT	3	48.59±5.50 ^a	186.21±5.19 ^a
悬臂辅助模式	3	51.64±6.72 ^a	185.13±3.18 ^a
手持模式	3	157.04±26.68	331.65±17.11
统计量值		33.563	48.435
P 值		<0.001	<0.001

注:与手持模式比较,^a $P<0.001$ (单因素方差分析,Bonferroni 检验)

OCT:光学相干断层扫描

Note:Compared with hand-held imaging mode,^a $P<0.05$ (One-way ANOVA,Bonferroni test) OCT:optical coherence tomography

表 4 悬臂辅助支撑模式对仰卧位受检者成像中深度轴向和快轴横向运动偏移量比较($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

Table 4 Comparison of axial and lateral offsets in imaging of subjects by handheld OCT in supine position ($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

受检者	例数/眼数	深度轴向(z 轴)	快轴横向(x 轴)
健康成年人	4/8	46.0±12.4	225.0±6.6
镇静状态婴幼儿	2/2	65.0±19.2	585.0±14.4 ^a
清醒状态婴幼儿	4/4	72.0±26.7	1 132.0±43.4 ^a
F 值		1.097	8.542
P 值		0.385	0.013

注:与健康成年人比较,^a $P<0.05$ (单因素方差分析,Bonferroni 检验)

OCT:光学相干断层扫描

Note:Compared with healthy adults,^a $P<0.05$ (One-way ANOVA, Bonferroni test) OCT:optical coherence tomography

3 讨论

本研究通过自主开发的悬臂手持式 OCT 系统对健康成年人及婴幼儿进行多应用场景成像临床测试,结果显示悬臂手持式 OCT 不仅可以对婴幼儿及仰卧位成人有效成像,在坐位应用场景下,也获得了与台式 OCT 设备相当的成像稳定性。

常规 OCT 成像评价研究中,运动伪影等干扰会导致轴向投影 en-face 图像出现条纹变形等现象,此类现象可用于评估设备成像及操作的稳定性。本研究通过计算 OCT 三维影像中的相邻图像间深度轴向与快轴横向的相对位移值,定量分析了悬臂手持式 OCT 系统的操作稳定性。通过悬臂手持式 OCT 系统的手持模式、悬臂辅助模式与传统台式 OCT 设备,分别对模型眼、健康成年人及婴幼儿进行成像对比。本研究将 OCT 三维图像数据组中连续 B-scan 图像间横向和轴向自相关分析方法引入 OCT 成像稳定性评价研究,定量计算快速扫描方向、轴向连续 B-scan 间的相对位移值,以定量评价 OCT 成像过程中因外部干扰及人体自身眼动等因素引入运动伪影所引起的条纹变形现象,有效反映了悬臂手持式 OCT 系统在多应用场景、多种操作模式下成像的有效性与操作稳定性。

与常规手持 SD-OCT 系统相比,本课题组研发的悬臂手持式 OCT 系统具有更紧凑的系统设计、更稳定和便捷的成像操作程序,并且采用悬臂支架等辅助成像装置,在坐位及仰卧位等多成像应用场景下均取得与台式 OCT 系统相当的成像稳定性。同时,手持式探头可借助悬臂支架的自锁功能实现水平固定,结合头架、下颌托支架及固视灯等辅助装置,可实现常规台式 OCT 系统的坐位检查模式。本研究结果也表明,悬臂辅助模式对坐位状态下受检者的成像稳定性与台式 OCT 设备相当,健康成年人与模型眼的坐位成像数据

与以往报道中台式 OCT 获取的关于呼吸和心跳引起的轴向运动以及不自主的侧移和眼动数据相近^[21-23], 证明本系统的成像稳定性可以取得与 OCT 设备相当的效果。与手持操作模式相比, 悬臂手持 OCT 在辅助支撑模式下, 配合眼科检查仪器的头架、下颌托等装置, 可有效抑制手持式操作不稳定引起的眼动伪影。由于悬臂辅助模式下模型眼通过支架固定并侧向放置, 相比于手持模式中模型眼桌面静止放置, 相对增加了 OCT 探头与模型眼的相对运动, 故轴向和横向运动的平均峰-峰值也有所增加。对于难以配合的婴幼儿、卧床患者和术中患者等特殊场景, 悬臂辅助支撑模式可提供常规台式 OCT 设备无法开展的成像功能。因此, 本研究的手持 OCT 采用悬臂辅助模式可获得优于单纯手持式 OCT 的成像稳定性, 适用于婴幼儿眼病常规检查及便携式设备大规模临床筛查中长时间连续的手持操作。

综上, 本研究的悬臂手持式 OCT 系统既兼具手持式 OCT 设备的操作便利性以及台式 OCT 设备的成像稳定性, 可适应坐位、卧位等多种临床检查模式, 填补了国内成年人卧位成像及婴幼儿成像 OCT 的核心技术及临床应用空白, 拓展了传统眼科台式 OCT 应用场景, 同时可为康复科、麻醉科、神经科、耳鼻喉科、心脑血管疾病诊断及宠物医学等相关医学专业提供关键共性技术参考分享, 具有广阔的应用前景。但本研究开发的 OCT 系统仍存在成像深度较低、视野较小等局限。后续研究中, 仍需提高成像速度、优化信噪比、改进扫描模式和后处理算法以实现更高成像质量^[27]。由于多模态系统能够提供充分和全面的信息^[26], 未来在手持式 OCT 系统研究中将整合包括眼微血管成像在内的其他眼科成像模式, 以提供更全面、综合的诊断信息, 并开展更大规模、更大样本量和设置对照组的系统性临床研究。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 段铮昱: 实验设计、系统搭建、文章撰写; 李嘉雄: 数据统计分析; 骆仲舟: 系统软件测试; 张金泽: 数据采集及影像资料整理; 黄远聪: 数据整理; 袁进: 研究指导、论文审阅; 肖鹏: 研究指导、论文审阅及定稿

志谢 感谢本次科研及论文写作过程广东省眼科诊疗与创新技术工程中心同事的指导和支持

参考文献

- Atchison DA, Thibos LN. Optical models of the human eye [J]. Clin Exp Optom, 2016, 99(2): 99-106. DOI: 10.1111/cxo.12352.
- Liu W, Zhang HF. Photoacoustic imaging of the eye: a mini review [J]. Photoacoustics, 2016, 4(3): 112-123. DOI: 10.1016/j.pacs.2016.05.001.
- Fujimoto JG, Pitris C, Boppart SA, et al. Optical coherence tomography: an emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy [J]. Neoplasia, 2000, 2(1-2): 9-25. DOI: 10.1038/sj.neo.7900071.
- Wojtkowski M, Bajraszewski T, Gorczyńska I, et al. Ophthalmic imaging by spectral optical coherence tomography [J]. Am J Ophthalmol, 2004, 138(3): 412-419. DOI: 10.1016/j.ajo.2004.04.049.
- Twa MD. Ophthalmic imaging trends [J]. Optom Vis Sci, 2021, 98(5): 427-428. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001713.
- Maldonado RS, Toth CA. Optical coherence tomography in retinopathy of prematurity: looking beyond the vessels [J]. Clin Perinatol, 2013, 40(2): 271-296. DOI: 10.1016/j.clp.2013.02.007.
- Tsui E, Schempf TA, Besirli CG, et al. Imaging and testing in pediatric retina: a current review of the literature [J]. Int Ophthalmol Clin, 2019, 59(1): 15-37. DOI: 10.1097/IIO.0000000000000260.
- Kim SJ, Port AD, Swan R, et al. Retinopathy of prematurity: a review of risk factors and their clinical significance [J]. Surv Ophthalmol, 2018, 63(5): 618-637. DOI: 10.1016/j.survophthal.2018.04.002.
- Hartnett ME, Penn JS. Mechanisms and management of retinopathy of prematurity [J]. N Engl J Med, 2012, 367(26): 2515-2526. DOI: 10.1056/NEJMr1208129.
- Lim LS, Mitchell P, Seddon JM, et al. Age-related macular degeneration [J]. Lancet, 2012, 379(9827): 1728-1738. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)60282-7.
- Ambati J, Fowler BJ. Mechanisms of age-related macular degeneration [J]. Neuron, 2012, 75(1): 26-39. DOI: 10.1016/j.neuron.2012.06.018.
- Gundlach BS, Tsui I. Optical coherence tomography in pediatric patients: a clinical review [J]. Ther Adv Ophthalmol, 2020, 12: 2515841420904612. DOI: 10.1177/2515841420904612.
- Rickman CB, Farsiu S, Toth CA, et al. Dry age-related macular degeneration: mechanisms, therapeutic targets, and imaging [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2013, 54(14): ORSF68-80. DOI: 10.1167/iiov.13-12757.
- Liu X, Kale AU, Capewell N, et al. Optical coherence tomography (OCT) in unconscious and systemically unwell patients using a mobile OCT device: a pilot study [J/OL]. BMJ Open, 2019, 9(11): e030882 [2025-05-28]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31699727/. DOI: 10.1136/bmjopen-2019-030882.
- Hsu ST, Chen X, Ngo HT, et al. Imaging infant retinal vasculature with OCT angiography [J]. Ophthalmol Retina, 2019, 3(1): 95-96. DOI: 10.1016/j.oret.2018.06.017.
- Mallipatna A, Vinekar A, Jayadev C, et al. The use of handheld spectral domain optical coherence tomography in pediatric ophthalmology practice: our experience of 975 infants and children [J]. Indian J Ophthalmol, 2015, 63(7): 586-593. DOI: 10.4103/0301-4738.167108.
- Lee H, Proudlock FA, Gottlob I. Pediatric optical coherence tomography in clinical practice—recent progress [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2016, 57(9): OCT69-79. DOI: 10.1167/iiov.15-18825.
- Tran-Viet D, Wong BM, Mangalesh S, et al. Handheld spectral domain optical coherence tomography imaging through the undilated pupil in infants born preterm or with hypoxic injury or hydrocephalus [J]. Retina, 2018, 38(8): 1588-1594. DOI: 10.1097/IAE.0000000000001735.
- Duan ZY, Huang K, Luo ZZ, et al. Portable boom-type ultrahigh-resolution OCT with an integrated imaging probe for supine position retinal imaging [J]. Biomed Opt Express, 2022, 13(6): 3295-3310. DOI: 10.1364/BOE.456435.
- Zawadzki RJ, Fuller AR, Choi SS, et al. Correction of motion artifacts and scanning beam distortions in 3D ophthalmic optical coherence tomography imaging [C]. Ophthalmic Technologies XVII, 2007, 6426: 35-45. DOI: 10.1117/12.701524.
- Potsaid B, Gorczyńska I, Srinivasan VJ, et al. Ultrahigh speed spectral / Fourier domain OCT ophthalmic imaging at 70,000 to 312,500 axial scans per second [J]. Opt Express, 2008, 16(19): 15149-15169. DOI: 10.1364/oe.16.015149.
- de Kinkelder R, Kalkman J, Faber DJ, et al. Heartbeat-induced axial motion artifacts in optical coherence tomography measurements of the retina [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2011, 52(6): 3908-3913. DOI: 10.1167/iiov.10-6738.
- Stevenson SB, Roorda A. Correcting for miniature eye movements in high-resolution scanning laser ophthalmoscopy [C]. Ophthalmic Technologies XV, 2005, 5688: 145-151. DOI: 10.1117/12.591190.
- Makita S, Hong Y, Yamanari M, et al. Optical coherence angiography [J]. Opt Express, 2006, 14(17): 7821-7840. DOI: 10.1364/oe.14.007821.
- Yoo JC, Han TH. Fast normalized cross-correlation [J]. Circuits, Syst Signal Process, 2009, 28: 819-843. DOI: 10.1007/s00034-009-9130-7.
- Xiao P, Duan Z, Wang G, et al. Multi-modal anterior eye imager combining ultra-high resolution OCT and microvascular imaging for structural and functional evaluation of the human eye [J]. Appl Sci, 2020, 10(7): 2545. DOI: 10.3390/app10072545.
- Chen Y, Li J, Luo Z, et al. Semi-supervised speckle noise reduction in OCT images with UNet and swin-Uformer [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2024, 73: 1-10. DOI: 10.1109/TIM.2024.3381655.

(收稿日期: 2025-06-30 修回日期: 2025-08-20)

(本文编辑: 张宇 骆世平)

