

波前像差引导的LASIK术后高阶像差的变化及其对视觉质量的影响研究进展

殷和平, 杜之渝*

重庆医科大学附属第二医院眼科, 重庆

收稿日期: 2025年1月26日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年2月27日

摘 要

随着屈光手术技术的发展, 患者对术后视觉质量的关注已逐渐超越单纯的裸眼视力提升。波前像差引导的LASIK技术通过个性化切削设计和精确的波前测量, 显著减少术后高阶像差(HOAs)的发生, 优化了术后视觉效果, 成为近年来屈光手术领域的研究热点。然而, 术后视觉质量仍可能受到高阶像差的负面影响, 表现为眩光、光晕、夜间视力下降以及对比敏感度降低等问题, 这些仍是影响患者满意度和术后效果的核心难题。本文系统综述了波前像差引导的LASIK手术在减少术后高阶像差和优化视觉质量方面的优势, 详细探讨了术后高阶像差的变化规律及其对视觉质量的多维影响, 分析了相关影响因素及技术局限性。结合现有研究成果, 本文展望了波前像差技术未来在设备改进、个性化设计及术后管理等方面的发展方向, 以期为进一步提升手术设计和患者满意度提供科学依据。

关键词

波前像差, LASIK, 高阶像差, 视觉质量, 对比敏感度

Research Progress on Postoperative Changes in Higher-Order Aberrations and Their Impact on Visual Quality after Wavefront-Guided LASIK Surgery

Heping Yin, Zhiyu Du*

Department of Ophthalmology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Jan. 26th, 2025; accepted: Feb. 19th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 殷和平, 杜之渝. 波前像差引导的 LASIK 术后高阶像差的变化及其对视觉质量的影响研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(2): 1095-1101. DOI: 10.12677/acm.2025.152449

Abstract

With the advancement of refractive surgical techniques, patients' focus on postoperative visual quality has gradually shifted from mere improvement in unaided visual acuity to a more comprehensive assessment. Wavefront-guided LASIK technology, through personalized ablation designs and precise wavefront measurements, significantly reduces the occurrence of postoperative higher-order aberrations (HOAs), thereby optimizing postoperative visual outcomes. This approach has become a research hotspot in the field of refractive surgery in recent years. However, postoperative visual quality may still be negatively affected by higher-order aberrations, manifested as glare, halos, reduced night vision, and decreased contrast sensitivity. These issues remain core challenges affecting patient satisfaction and surgical outcomes. This review systematically summarizes the advantages of wavefront-guided LASIK surgery in reducing postoperative higher-order aberrations and optimizing visual quality. It also discusses in detail the patterns of changes in higher-order aberrations and their multidimensional impact on visual quality, analyzing relevant influencing factors and technical limitations. In light of existing research, the article also anticipates future developments of wavefront aberration technology in areas such as equipment improvements, personalized design, and postoperative management, aiming to provide scientific evidence for further enhancing surgical design and patient satisfaction.

Keywords

Wavefront Aberrations, LASIK (Laser in Situ Keratomileusis), Higher-Order Aberrations (HOAs), Visual Quality, Contrast Sensitivity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人眼作为复杂的光学系统,存在低阶像差(如近视、远视和散光)和高阶像差(如球差、彗差和三叶草像差) [1]。高阶像差(HOAs)是影响视觉质量的重要因素,其增大会导致眩光、光晕、对比敏感度下降以及夜间视力模糊[2]。传统 LASIK 手术采用非个性化切削设计,常导致术后高阶像差增加,影响患者的视觉质量[3]。波前像差引导的 LASIK 手术通过术前精确测量波前像差,为个性化切削提供依据,显著减少患者术后高阶像差,优化视觉效果,成为屈光手术领域的研究热点[4]。近年来的研究表明,术后高阶像差变化的多样性及其对视觉质量的影响已成为屈光手术领域的研究热点。理解高阶像差的变化规律及其影响因素对进一步提升术后视觉质量至关重要。本文系统综述了波前像差引导 LASIK 手术在减少术后高阶像差和优化视觉质量方面的优势。结合现有研究成果,本文展望了波前像差技术未来在设备改进、个性化设计、术后管理及患者体验优化等方面的发展方向,以期为进一步提升手术设计和患者满意度提供科学依据。

2. 波前像差引导 LASIK 术后高阶像差的变化

波前像差引导技术基于波前传感器(如 Hartmann-Shack 像差仪)的高精度测量,能够捕捉患者眼部屈光系统中的低阶与高阶像差[5]。通过生成个性化的波前像差图,术前设计切削方案,术中利用准分子激光精确切削角膜,实现像差的全面矫正。这一技术的出现,旨在弥补传统 LASIK 手术的不足。传统 LASIK

手术以矫正低阶像差为核心目标,但由于采用非个性化的切削方式,术后高阶像差会显著增加,球差是LASIK术后最常见的高阶像差类型,其变化主要与切削深度及角膜中心和周边区域的光学差异有关,术后,球差的增加率可达30%~50%[6]-[9]。但波前像差引导技术通过个性化切削设计显著减少了这一现象。一项临床对比研究发现,采用波前引导技术的患者术后球差的平均增幅低于0.1 μm ,而传统LASIK手术可达0.3 μm [10] [11]。除了球差外,彗差和三叶草差也是影响视觉质量的重要高阶像差。彗差的变化通常与角膜切削中心的偏移、角膜瓣蒂的位置以及手术技术的精确度相关,其增加可能导致患者出现夜间视物重影的现象[12]。波前像差引导LASIK手术通过术前精准定位角膜中心,有效降低了术后彗差的发生率[13]。三叶草差的变化主要与角膜形态的术前异常和术中切削路径设计不合理有关。对于散光度数较高或角膜不规则的患者,术后三叶草差的增加率较高,但波前像差技术结合角膜地形图优化切削路径,可使三叶草像差的增加率减少。尽管波前像差引导的LASIK手术有效降低了术后高阶像差的增加幅度,但仍存在一定的个体差异。大部分患者术后球面像差和总高阶像差有所增加,而彗差和三叶草差的变化则因个体差异而波动[14]。术后高阶像差的变化受多种因素影响,主要包括患者相关因素、手术相关因素及术后恢复相关因素。患者相关因素:角膜厚度、瞳孔大小及术前高阶像差水平显著影响术后高阶像差的变化。例如,角膜中央厚度较薄的患者或术中角膜消耗更多的患者更容易在术后诱导更大的球差[15]。术后大瞳孔患者更易出现高阶像差,术前高阶像差水平较高的患者,术后可能仍然存在一定程度的高阶像差,甚至可能增加。手术相关因素:激光切削的光学区大小、切削深度及设备精度直接影响术后结果。光学区设计过小可能导致偏心切削[16]。切削深度过大可能导致角膜表面的不规则性增加。术后恢复相关因素:瘢痕愈合及泪膜质量变化对高阶像差有重要影响。手术初期的HOA增加可能与角膜表面重塑及愈合过程有关,而其后稳定性体现了波前引导技术的控制能力[17]。泪膜质量不佳的患者术后可能出现更为显著的彗差波动,泪膜不稳定会显著增加高阶像差,尤其在瞳孔扩大的条件下[18]。

3. 视觉质量的评估方法

视觉质量的评价在屈光术后具有重要意义。随着技术的进步,传统的视力已无法全面反映术后实际效果,因此引入了视觉质量的概念,视觉质量的评估又可分为主观测量和客观测量两类。主观测量方法主要依赖患者自身的感受和报告,通常包括对比敏感度测试和问卷调查。对比敏感度作为评估视觉质量的重要指标,能够反映患者在低、中、高对比度环境中的视觉表现。常见的对比敏感度测试包括Pelli-Robson视力表和CSV-1000测试卡[19],这些测试帮助医生更全面地了解患者在不同光照条件下的视觉质量。此外,主观评估还包括常用的问卷工具,如NEI-VFQ-25(美国国立眼科研究所视觉功能问卷)[20],这些问卷可以评估患者在日常生活中的视觉质量的主观体验,涵盖了诸如光晕、眩光和夜间视力等方面。这些主观测量方法帮助临床医生更全面地了解患者术后的视觉感受。然而,主观评估方法也存在局限性,例如患者的个体差异可能导致结果的主观性和不稳定性,受患者主观感知、心理状态和环境影响较大。客观测量方法通过精确仪器评估术后视觉质量,包括多个关键的量化指标。高阶像差(Higher-Order Aberrations, HOA)是最常用的客观指标之一,通过波前像差分析仪测量眼球光学系统中超越低阶像差(如散光和近视)的更复杂像差,主要包括球差、彗差和三叶草差等,这些像差的矫正对提高术后视觉质量尤为重要[21],然而,高阶像差仅能反映光学系统的特性,无法完全解释主观视觉感受中的光晕或眩光问题。客观散射指数(Objective Scatter Index, OSI)用于量化眼内散射光的程度,反映患者视觉清晰度和对比度的变化,OSI的增加通常与视觉模糊和光散射相关[22],但OSI主要受到晶状体或角膜透明度的影响,无法直接评估整个光学系统对视觉质量的综合影响[23]。调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是另一个关键指标,通过测量光学系统对不同空间频率的反应能力来评估成像质量,其数值越高,说明系统在传递图像细节时表现越好[24]。点扩散函数(Point Spread Function, PSF)是对光学系统分辨率的表征,

通过分析一个点光源在视网膜上的成像来量化视觉清晰度和像差影响[25]。斯特列尔比(Strehl Ratio)通过比较实际光学系统与理想衍射极限系统的峰值强度来评估光学性能, 其值越接近 1, 说明光学系统越接近完美[26]。这些客观评价指标从不同角度全面反映了屈光手术后视觉质量的变化, 为医生提供了理解手术效果的量化依据。

4. 波前像差引导的 LASIK 术后高阶像差的变化及其对视觉质量的影响

术后高阶像差的增加是导致视觉质量下降的重要原因之一, 尤其对对比敏感度和夜间视力有显著影响。研究表明, 高阶像差的增加会显著降低中高频空间频率(6c/d、12c/d)条件下的对比敏感度, 从而影响患者的视觉清晰度和夜间视物能力[27]。此外, 球差和彗差的增加与夜间视力问题(如眩光 and 光晕)密切相关[15], 这不仅对驾驶能力造成负面影响, 还显著降低了患者的整体视觉满意度。通过优化光学区设计和加强术后管理, 可以在一定程度上改善夜间视觉质量。然而, 高阶像差的增加对患者的整体视觉体验仍然构成挑战, 尽管术后裸眼视力显著提高, 但对比敏感度和夜间视力的下降却削弱了患者的术后满意度。因此, 未来研究可更加关注高阶像差对主观视觉质量的影响及其量化评价, 以进一步提高患者的术后体验。波前像差引导的 LASIK 技术在这一方面展现了显著的临床优势, 其通过个性化设计和高精度的激光切削, 有效减少了术后高阶像差的发生率。相比之下, 波前像差优化 LASIK 虽能够减少手术诱导的球差, 但对术前已有的高阶像差改善有限, 因此夜间视觉质量的改善效果不如波前像差引导[28]; Q 值引导 LASIK 以减少球差为目标, 在降低术后光晕和优化光学性能方面表现出良好的效果, 但对其他高阶像差(如彗差)的影响较弱[29]; 角膜地形图引导 LASIK 则通过优化角膜形态, 显著改善了术前因角膜不规则引起的高阶像差, 特别适用于角膜不规则患者或术后并发症患者, 但对普通屈光不正患者的高阶像差改善有限[30]。这些手术方式各具特点, 波前像差引导技术因其个性化设计和高精度切削在减少高阶像差和改善视觉质量方面展现了突出的临床优势。此外, 结合二次手术和术后泪膜稳定性管理等手段, 可以进一步优化术后视觉质量, 推动患者术后视觉效果全面提升。

5. 小结与展望

术后视觉质量的下降是一个多因素综合结果, 其中高阶像差的增加和干眼症[31]是主要原因, 均可导致对比敏感度降低、夜间视力问题以及整体视觉满意度下降。个体差异以及术中技术(如激光切削精度、眼动追踪控制、角膜瓣制作质量等)仍对术后效果产生重要影响, 而术后恢复过程中的个体差异(如角膜愈合和泪膜稳定性[32] [33])进一步影响患者的最终视觉质量。未来发展可聚焦于人工智能辅助的术前设计优化[34] [35]、新型波前像差测量技术的开发[36], 以及更精准的手术矫正方案, 以实现更高水平的术后视觉质量, 同时通过术后管理减轻干眼症等并发症的影响, 从而全面提升术后视觉效果。为实现这些目标, 人工智能技术在屈光手术中的应用发挥了重要作用。近年来, 尤其在个性化手术规划和结果预测方面取得了显著进展。例如, 基于机器学习的模型在 SMILE 手术中通过术前生物学参数优化了个性化治疗方案, 不仅提高了手术结果的稳定性, 还减少了术后并发症的发生率[37]。此外, AI 决策支持系统能够整合医生的手术选择数据与患者的术前特征(如屈光度和角膜形态), 为手术类型(如 LASIK、SMILE 或 PRK)的个性化推荐提供科学依据, 从而优化术前设计[38]。研究还表明, 结合大数据分析的 AI 预测模型, 可以整合多种术前参数, 精准预测术后视觉质量及可能出现的并发症, 为个性化手术设计提供了更强的数据支持[39]。不仅如此, AI 技术在术中同样展现出巨大潜力, 例如结合增强现实(AR)技术和眼动追踪系统, AI 能够实时监测和反馈手术状态, 提高激光切削的精度和安全性, 进一步提升手术效果[40]。随着这些技术的不断发展, 人工智能将推动屈光手术从传统经验驱动向数据驱动模式的转变, 为个性化治疗方案的优化和术后视觉质量的全面提升提供重要支持。在新型波前像差测量技术的开发方面, 有多项

研究路径值得探索。首先, 自适应光学技术(Adaptive Optics, AO)的进一步发展为波前测量提供了更高的分辨率和实时动态测量能力。AO 结合相干光学断层扫描(Optical Coherence Tomography, OCT)技术, 能够同时获取角膜和晶状体的高分辨率数据, 为术前评估和术后监测提供了重要支持[41]。其次, 多模态成像技术(Multimodal Imaging)通过整合波前像差分析与角膜地形图、眼轴测量等数据, 可以从多维度优化术前设计[42]。此外, 深度学习模型已被用于预测术后波前像差变化, 其精准性和效率显著高于传统方法[43]。未来, 新型波前像差测量技术将结合这些路径, 进一步提升术后视觉质量的评估和矫正能力。

参考文献

- [1] 王雁, 赵堪兴. 波前像差与临床视觉矫正[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011.
- [2] Chalita, M. (2004) Wavefront Analysis in Post-Lasik Eyes and Its Correlation with Visual Symptoms, Refraction, and Topography. *Ophthalmology*, **111**, 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2003.06.022>
- [3] 孙平, 马晓蓉, 王秀敏, 等. 波前像差引导的 LASIK 术治疗近视的临床观察[J]. 实用临床医药杂志, 2010, 14(13): 136-137.
- [4] 刘苏冰, 王丽娅, 聂晓丽, 等. 波前像差引导的准分子激光原位角膜磨镶术后视觉质量评价[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2009, 38(2): 269-272.
- [5] Thibos, L.N. (2000) Principles of Hartmann-Snack Aberrometry. *Journal of Refractive Surgery*, **16**, S563-S565. <https://doi.org/10.3928/1081-597x-20000901-14>
- [6] 刘明娜, 史伟云, 高华等. FS-LASIK 与 SMILE 术后角膜高阶像差变化比较[J]. 中华实验眼科杂志, 2023, 41(8): 755-762.
- [7] Moreno-Barriuso, E., Lloves, J.M., Marcos, S., et al. (2001) Ocular Aberrations before and after Myopic Corneal Refractive Surgery: LASIK-Induced Changes Measured with Laser Ray Tracing. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **42**, 1396-1403.
- [8] Feng, Z., Wang, Q., Du, C., Yang, F. and Li, X. (2021) High-Order Aberration Changes after Femtosecond LASIK Surgery in Patients with High Myopia. *Annals of Palliative Medicine*, **10**, 7689-7696. <https://doi.org/10.21037/apm-21-1677>
- [9] Mrochen, M., Kaemmerer, M. and Seiler, T. (2001) Clinical Results of Wavefront-Guided Laser *in Situ* Keratomileusis 3 Months after Surgery. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **27**, 201-207. [https://doi.org/10.1016/s0886-3350\(00\)00827-0](https://doi.org/10.1016/s0886-3350(00)00827-0)
- [10] Machat, J.J. (2002) The Reduction of Spherical Aberration with Wavefront Guided LASIK Using the Wavelight Allegretto Wave Excimer Laser. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **43**, 4153.
- [11] 李婧媛, 李淑琴, 万婧. 波前像差引导 FS-LASIK 治疗近视合并不同程度散光的临床疗效研究[J]. 海南医学, 2023, 34(20): 2954-2958.
- [12] 王雁, 徐路路. 进一步提高屈光手术患者的视觉质量[J]. 眼科, 2014, 23(3): 145-148.
- [13] 袁牧之, 林颖, 张霞, 等. 波前像差引导的 LASIK 手术与传统 LASIK 手术的疗效对比研究[J]. 海南医学院学报, 2013, 19(11): 1589-1591.
- [14] Al-Zeraid, F.M. and Osuagwu, U.L. (2016) Induced Higher-Order Aberrations after Laser *in Situ* Keratomileusis (LASIK) Performed with Wavefront-Guided IntraLase Femtosecond Laser in moderate to high Astigmatism. *BMC Ophthalmology*, **16**, Article No. 29.
- [15] 崔敏, 周奇志. 波前像差引导的飞秒激光 LASIK 手术矫正高度近视的效果[J]. 国际眼科杂志, 2013, 13(11): 2287-2289.
- [16] 李羽, 汪思瑶, 郭玉娟, 等. 飞秒激光 LASIK 术后视觉质量的研究进展[J]. 医药论坛杂志, 2023, 44(24): 108-112+129.
- [17] Durán, J.A., Gutiérrez, E., Atienza, R. and Piñero, D.P. (2017) Vector Analysis of Astigmatic Changes and Optical Quality Outcomes after Wavefront-Guided Laser *in Situ* Keratomileusis Using a High-Resolution Aberrometer. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **43**, 1515-1522. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2017.08.020>
- [18] 周传清, 任秋实. 人眼波面象差与超视力的研究与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007(4): 26-34.
- [19] Mäntyjärvi, M. and Laitinen, T. (2001) Normal Values for the Pelli-Robson Contrast Sensitivity Test. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **27**, 261-266. [https://doi.org/10.1016/s0886-3350\(00\)00562-9](https://doi.org/10.1016/s0886-3350(00)00562-9)
- [20] Margolis, M.K., Coyne, K., Kennedy-Martin, T., Baker, T., Schein, O. and Revicki, D.A. (2002) Vision-Specific Instruments

- for the Assessment of Health-Related Quality of Life and Visual Functioning. *PharmacoEconomics*, **20**, 791-812. <https://doi.org/10.2165/00019053-200220120-00001>
- [21] Kim, H. and Joo, C. (2005) Visual Quality after Wavefront-Guided LASIK for Myopia. *Journal of Korean Medical Science*, **20**, 860-865. <https://doi.org/10.3346/jkms.2005.20.5.860>
 - [22] Waring, G.O. and Rocha, K.M. (2018) Characterization of the Dysfunctional Lens Syndrome and a Review of the Literature. *Current Ophthalmology Reports*, **6**, 249-255. <https://doi.org/10.1007/s40135-018-0190-3>
 - [23] 俞晓宇, 丁锡霞, 李璋亮, 等. 年龄相关性白内障患者视觉质量与其晶状体区域密度的相关性[J]. 国际眼科杂志, 2017, 17(1): 6-10.
 - [24] Kawamorita, T. and Uozato, H. (2005) Modulation Transfer Function and Pupil Size in Multifocal and Monofocal Intraocular Lenses *in Vitro*. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **31**, 2379-2385. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2005.10.024>
 - [25] Charman, W.N. (2005) Wavefront Technology: Past, Present and Future. *Contact Lens and Anterior Eye*, **28**, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.clae.2005.02.003>
 - [26] Ottevaere, H. and Thienpont, H. (2005) Optical Microlenses. In: Guenther, R.D., Eds., *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, 21-43. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369395-0/00923-4>
 - [27] 田海燕, 王彬, 霍建新. LASIK 术后高阶像差对视觉质量影响的研究进展[J]. 现代生物医学进展, 2014, 14(17): 3393-3395.
 - [28] Chiang, B. and Manche, E.E. (2023) Comparison of Subjective Visual Experiences and Ocular Symptoms after Wavefront-Guided and Wavefront-Optimized LASIK in a Prospective Fellow Eye Study. *American Journal of Ophthalmology*, **251**, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2023.02.018>
 - [29] Zhang, K., Fang, X., Zhang, Y. and Chao, M. (2020) Comparison of Q-Value-Guided Laser-Assisted *in Situ* Keratomileusis and Standard Laser *in Situ* Keratomileusis for Myopia. *Medicine*, **99**, e21563. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000021563>
 - [30] Pasquali, T. and Krueger, R. (2012) Topography-Guided Laser Refractive Surgery. *Current Opinion in Ophthalmology*, **23**, 264-268. <https://doi.org/10.1097/ico.0b013e328354adff>
 - [31] Binder, P.S. and Charlton, K.H. (1992) Surgical Procedures Performed after Refractive Surgery. *Journal of Refractive Surgery*, **8**, 61-74. <https://doi.org/10.3928/1081-597x-19920101-14>
 - [32] Szczotka-Flynn, L.B., Maguire, M.G., Ying, G., Lin, M.C., Bunya, V.Y., Dana, R., *et al.* (2019) Impact of Dry Eye on Visual Acuity and Contrast Sensitivity: Dry Eye Assessment and Management Study. *Optometry and Vision Science*, **96**, 387-396. <https://doi.org/10.1097/oxp.0000000000001387>
 - [33] Netto, M.V., Mohan, R.R., Ambrósio, R., Hutcheon, A.E.K., Zieske, J.D. and Wilson, S.E. (2005) Wound Healing in the Cornea: A Review of Refractive Surgery Complications and New Prospects for Therapy. *Cornea*, **24**, 509-522. <https://doi.org/10.1097/01.icc.0000151544.23360.17>
 - [34] Chen, Q., Li, M., Yuan, Y., Me, R., Yu, Y., Shi, G., *et al.* (2017) Effects of Tear Film Lipid Layer Thickness and Blinking Pattern on Tear Film Instability after Corneal Refractive Surgery. *Cornea*, **36**, 810-815. <https://doi.org/10.1097/ico.0000000000001207>
 - [35] Ang, M., Gatineau, D., Reinstein, D.Z., Mertens, E., Alió del Barrio, J.L. and Alió, J.L. (2020) Refractive Surgery beyond 2020. *Eye*, **35**, 362-382. <https://doi.org/10.1038/s41433-020-1096-5>
 - [36] Vacalebre, M., Frison, R., Corsaro, C., Neri, F., Conoci, S., Anastasi, E., *et al.* (2022) Advanced Optical Wavefront Technologies to Improve Patient Quality of Vision and Meet Clinical Requests. *Polymers*, **14**, Article No. 5321. <https://doi.org/10.3390/polym14235321>
 - [37] Cui, T., Wang, Y., Ji, S., Li, Y., Hao, W., Zou, H., *et al.* (2020) Applying Machine Learning Techniques in Nomogram Prediction and Analysis for SMILE Treatment. *American Journal of Ophthalmology*, **210**, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2019.10.015>
 - [38] Li, J., Dai, Y., Mu, Z., Wang, Z., Meng, J., Meng, T., *et al.* (2024) Choice of Refractive Surgery Types for Myopia Assisted by Machine Learning Based on Doctors' Surgical Selection Data. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, **24**, Article No. 41. <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02451-0>
 - [39] Achiron, A., Gur, Z., Aviv, U., Hilely, A., Mimouni, M., Karmona, L., *et al.* (2017) Predicting Refractive Surgery Outcome: Machine Learning Approach with Big Data. *Journal of Refractive Surgery*, **33**, 592-597. <https://doi.org/10.3928/1081597x-20170616-03>
 - [40] Jayadev, C. and Shetty, R. (2020) Artificial Intelligence in Laser Refractive Surgery—Potential and Promise! *Indian Journal of Ophthalmology*, **68**, 2650-2651. https://doi.org/10.4103/ijo.ijo_3304_20
 - [41] Burns, S.A., Elsner, A.E., Sapoznik, K.A., Warner, R.L. and Gast, T.J. (2019) Adaptive Optics Imaging of the Human Retina. *Progress in Retinal and Eye Research*, **68**, 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2018.08.002>

-
- [42] Ambrósio Jr, R. (2020) Multimodal Imaging for Refractive Surgery: Quo Vadis? *Indian Journal of Ophthalmology*, **68**, 2647-2649. <https://doi.org/10.4103/0301-4738.301283>
- [43] Shohani, J.B., Hajimahmoodzadeh, M. and Fallah, H. (2023) Using a Deep Learning Algorithm in Image-Based Wavefront Sensing: Determining the Optimum Number of Zernike Terms. *Optics Continuum*, **2**, 632-645. <https://doi.org/10.1364/optcon.485330>