

不同眼球旋转补偿方法及其对 SMILE 手术影响的研究进展

侯杰,雷玉琳

引用:侯杰,雷玉琳.不同眼球旋转补偿方法及其对 SMILE 手术影响的研究进展.国际眼科杂志,2025,25(6):938-941.

基金项目:济南市卫生健康委员会科技发展计划项目(No.2024306016)

作者单位:(250200)中国山东省济南市,济南明水眼科医院

作者简介:侯杰,博士,副主任医师,研究方向:屈光手术与视光学、圆锥角膜诊疗。

通讯作者:雷玉琳,博士,主任医师,硕士研究生导师,研究方向:屈光手术与视光学、圆锥角膜诊疗. lei.yulin642@126.com

收稿日期:2024-09-28 修回日期:2025-04-21

摘要

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE)中眼球旋转是影响术后散光矫正效果的因素之一,显著的眼球旋转会引起术后散光欠矫、高阶像差增加等不良结果。因 VisuMax 飞秒激光系统缺乏眼球追踪及虹膜定位系统,增加了散光精准矫正的难度。精确测量眼球旋转度可以有效地指导手术的设计,提高手术的安全性和术后视觉质量。目前已有不同方法测量患者术中的眼球旋转并对其进行定位补偿。文章从屈光手术中的眼球旋转特点、SMILE 手术眼球旋转定位补偿方法以及旋转补偿对 SMILE 术后效果的影响三个方面展开综述。

关键词:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE); 眼球旋转; 小切口; 近视; 散光

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.6.12

Progress of different cyclotorsion compensation methods and their effects on small incision lenticule extraction

Hou Jie, Lei Yulin

Foundation item: Science and Technological Development Plan Project of Jinan Municipal Health Commission (No.2024306016)

Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China

Correspondence to: Lei Yulin. Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China. lei.yulin642@126.com

Received:2024-09-28 Accepted:2025-04-21

Abstract

• Cyclotorsion of the eye is a factor that affects the accuracy of astigmatic correction after small incision

lenticule extraction (SMILE), potentially leading to unexpected outcomes such as astigmatic undercorrection and an increase in higher-order aberrations. One possible explanation for these issues is the lack of active rotational tracking software in the VisuMax femtosecond laser system. Accurately measuring ocular cyclotorsion can effectively guide the design of the surgery and improve the postoperative visual quality. Several methods have been developed to measure and compensate for cyclotorsion during SMILE. This article reviews the characteristics of cyclotorsion in refractive surgery, the methods of cyclotorsion compensation, and the impact of cyclotorsion compensation on the outcomes of SMILE.

• **KEYWORDS:** small incision lenticule extraction (SMILE); cyclotorsion; small incision; myopia; astigmatism

Citation: Hou J, Lei YL. Progress of different cyclotorsion compensation methods and their effects on small incision lenticule extraction. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(6): 938-941.

0 引言

屈光手术治疗过程中眼球的旋转会引起散光治疗轴向的改变,导致散光矫正不足、高阶像差增加等不良结果^[1-3]。目前,准分子激光平台可通过虹膜识别系统或眼球跟踪系统来定位或补偿术中的眼球旋转而进行治疗。飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)在矫正近视领域已获得良好的临床疗效验证,然而,VisuMax 飞秒激光系统因缺乏眼球追踪及虹膜定位系统,术中无法对患者眼球移动及旋转进行补偿,从而增加了术中定位和散光矫正的难度^[4-5]。近年来,众多研究提出各种旋转定位及补偿策略来应对 SMILE 术中眼球旋转,并且取得了一定的临床疗效^[6-9]。本文现就屈光手术中眼球旋转特点、不同的眼球旋转定位补偿方法及其对 SMILE 术后效果影响的研究进展三个方面进行综述。

1 屈光手术中的眼球旋转规律

角膜屈光手术过程中,眼球旋转的原因主要包括前庭系统引起的眼部旋转、头部或身体在激光下的移动引起的相对旋转,以及隐斜视的暴露等因素^[10]。眼球旋转包括静态旋转和动态旋转,静态眼球旋转指当患者从直立位转向仰卧位时,头部位置的变化使眼睛沿视觉轴旋转;术中发射激光时观察到的轻微旋转运动为动态眼球旋转^[11]。早期研究表明,在屈光手术中,约 38%的眼睛在静态眼球旋转时旋转超过 5°,而 68%的眼睛在静态和动态旋转中

均旋转超过 2° ^[11]。此外,坐位和仰卧位之间眼球旋转的个体变化范围为 -10.3° ~ $+24.0^{\circ}$ ^[3,12-14]。

不同测量方法所得到的眼球旋转规律各异。在基于虹膜识别技术的研究中,Ghosh 等^[15]发现有 74.2% 的患者出现了眼球旋转,28.5% 的眼睛没有显著旋转,平均旋转度数为 2.86° (范围: 0° ~ 9.2°)。Prickett 等^[3]将眼球旋转分为自主旋转和非自主旋转(体位变化引起),使用虹膜识别技术测量了 155 例 310 眼坐位和仰卧位的虹膜纹理,计算出总的眼球旋转量为 -8.30° ~ 9.20° (平均 1.43° ± 3.41°),每例患者的平均自主旋转和非自主旋转量分别为 1.43° ± 2.04° 和 -0.28° ± 2.72° 。在坐位和仰卧位之间有四种可能的双侧眼旋转模式:外旋、内旋、双侧顺时针旋转和双眼逆时针旋转。当总的眼球旋转作为共轭运动进行分析时,有 40.6% 的患者出现双眼外旋,8.4% 为双眼内旋,同时发生逆时针旋转的占 27.1%,顺时针占 20.6%,未发生旋转的患者数量占 3.2%。当分析平均自主旋转时,74.2% 的患者出现外旋,23.9% 的患者出现内旋,1.9% 的患者未出现相对运动。Zhao 等^[16]使用图像导航系统获取患者坐位及卧位下的图像并记录眼球旋转度,总眼球旋转发生率为 88.24%,平均旋转 4.6° ± 3.4° ,其中右眼以外旋为主,左眼以内旋为主。

在 SMILE 手术相关研究中,Ganesh 等^[5]基于人工角膜标记法测量了行 SMILE 手术的 81 例 81 眼(左眼)的眼球旋转量,术中平均旋转 5.64° ± 2.55° (2° ~ 12°),其中 38% 的眼发生外旋,44% 的眼发生内旋,而 18% 的眼没有表现出明显的旋转。在发生旋转的眼中,有 81% 的眼球旋转幅度为 5° 以内,17.6% 的眼旋转度在 6° 到 10° 之间,1.2% 的眼在 10° 以上。有研究用类似的方法,测量接受 SMILE 手术 353 例 622 眼术中的眼球旋转,结果显示 466 眼(71.5%)发生了显著的眼球旋转,平均旋转度为 2.82° ± 1.44° (绝对值),旋转范围为 0° ~ 10° ^[7]。其中,53% 的眼发生顺时针旋转,47% 的眼发生逆时针旋转,9.2% 的眼旋转度超过 5° 。Lucena 等^[17]使用 Amaris 准分子激光系统的静态眼球旋转功能,测量 61 例患者由坐位变为卧位的眼球旋转度,平均旋转度数为 2.74° ,最大外旋幅度 7.7° ,最大内旋幅度 -11° 。有 60.6% 的眼在 0° ~ 2.9° 之间,30.8% 的眼在 3.0° ~ 6.0° 之间,8.6% 的眼旋转超过 6.1° 。Köse^[8]使用自我开发的导航定位系统测量 SMILE 术中眼球旋转,发现 74.8% 的眼平均旋转 3.52° ± 2.23° (0° ~ 8°),25.2% 的眼没有旋转,11.3% 的眼旋转大于 5° 。Song 等^[18]使用软件测量 SMILE 术后切口旋转角度,并将其作为眼球旋转量,在 484 眼中有 219 眼(45.2%)发生外旋,235 眼(48.6%)发生内旋,30 眼(6.2%)眼无旋转,平均眼球旋转 1.18° ± 3.69° (0.5° ~ 11.4°)。

2 SMILE 手术相关的眼球旋转定位补偿方法

正确的散光轴向对齐是获得准确结果的关键,无补偿的眼球旋转被认为是屈光手术中轴向错位和术后散光欠矫的主要原因^[19-20],在 Visumax 激光系统中还没有一个集成的眼球旋转补偿系统,为了克服这一缺点,研究者们使用各种标记或定位技术治疗来确保 SMILE 矫正散光的精度。目前,在 SMILE 手术时进行定位补偿的方法主要包括以下几种方法。

2.1 人工角膜标记法

2.1.1 角膜缘标记调整头位法 术前患者坐于裂隙灯下,术者将裂隙光束聚焦在角膜水平位,使用标记笔在角膜缘 3:00 和 9:00 位置标记出水平轴。在仰卧位时常规摆正头位,术者根据 VisuMax 平台左侧屏幕上的网状水平线及角膜缘标记之间的相对位置调整头部进行对位补偿^[21-22]。

2.1.2 角膜标记旋转锥镜定位法 患者在坐位裂隙灯下表面麻醉后,嘱患者摆正头位并平视正前方,将裂隙灯光带调窄至 0.5 mm 左右并调整至水平位置经过瞳孔中心,使用标准的角膜标记笔在距离瞳孔中心水平位约 2 mm 的 3:00 及 9:00 位置标记。患者位于 VisuMax 飞秒激光下进行负压吸引后,通过显微镜目镜中水平轴标记观察标记线旋转程度,若有旋转,手动旋转负压锥镜使角膜标记的水平连线与目镜水平轴对齐,启动激光^[5-6,23]。

2.1.3 角膜三点标记定位法 术前患者取坐位,前两个角膜标记在水平子午线上间隔 7 mm,将裂隙灯束旋转至垂直方位后,在角膜下方进行第三个标记,位置上与第一浦肯野反射像或角膜共轴反光点相对应(平分此位置)。在负压吸引下,通过水平和垂直子午线上的三个参考点来实现静态眼球旋转的定位。该定位技术可通过手术屏幕直观地观察和调整,帮助验证患者在负压对接后的眼球定位情况^[24-25]。

使用标记笔时需要注意的要点包括:标记位置应适当,若距离角膜中心过近,可能会影响激光消融效果;若距离周边过近,则可能会超出切削区。理想情况下,标记应在手术前 30 min 内完成,力度适中,避免产生明显的晕染^[23]。有研究表明,传统的人工角膜标记方法在显微镜下具有较强的可视化效果,平均绝对误差为 2.8° ,角膜缘标记与水平参考线之间存在轻微偏差,平均偏差为 3.66° 。因此,标记技巧和对位的精准性在实际操作中尤为重要^[22]。

2.2 水平或十字交叉线定位法 在人工标记的基础上,Zhou 等^[26]在手术床的头枕两侧标记了红色水平线,同时在显微镜下方两侧的裂隙旋钮上系一条红线,患者躺卧位时确保耳垂边缘与头枕两侧红色标记线平行,医生调整其头位确保患者内外眦角平行于裂隙旋钮的红线,最后再调整角膜缘标记,使其与显微镜水平线对齐,随后启动手术。Li 等^[27]使用十字标记法进行了头位校准定位,术前在手术床头枕上进行十字标记后,手术时将十字激光笔光束的水平线和垂直线与头枕上标记的十字线相应对齐,患者平躺于手术床后闭眼,再确保激光水平线与双眼外眦对齐,垂直线与眉骨和鼻梁中线对齐,保持患者静止不动,并在睁眼前关闭十字线,启动手术。

2.3 可视化眼球导航系统定位 Köse^[8]开发了一种可视化眼球引导系统(Callisto 系统),该系统可在手术开始前与飞秒激光设备连接,用于引导手术进行旋转补偿。在手术前,使用 IOL Master 700 获取患者坐位下的眼球图像,通过 USB 导入 Callisto 系统。手术时,Callisto 系统在 VisuMax 激光系统下实时获取眼球图像,并以角膜缘血管作为参考点,将实时图像与坐位图像重叠。当角膜缘血管完全重叠时,系统会提示并激活确认按钮,此时,实时图像中的黄线表示患者坐位时的水平轴,黑线则表示 VisuMax

激光治疗的水平轴。术者通过调整手术床的操纵杆,使黄线对准视频窗口的中心,随后激活系统的Z轴对齐功能,测量旋转角度。Z轴对齐功能通过三条平行的蓝线实现,这些蓝线的角度可以手动旋转。当蓝线与监视器上的黑线重合时,黄线和蓝线之间的夹角即为眼球旋转的角度。为了补偿旋转,术者需调整患者的头部或身体位置,直到黑线与黄线重叠,随后启动手术。

2.4 静态眼球旋转辅助的旋转定位 患者坐位时使用角膜地形图设备捕捉到虹膜图像、瞳孔缘及角膜缘并存储数据。手术时患者处于仰卧位,在Amaris准分子激光设备下拍摄虹膜图像与第一次测量的数据进行比对,利用该设备的对位功能自动检测术中仰卧位时眼球静态旋转的角度。如果绝对值大于 1° ,则调整头位后重新测量,直到绝对值小于 1° ,术者沿着目镜下的水平线使用标记笔距离角膜缘1.5-2 mm位置标记两点。将患者转至VisuMax手术床进行SMILE手术时,医生根据目镜下的角膜缘标记调整头部位置,负压启动后,根据标记点及目镜水平线位置旋转锥镜直到两标记点与水平线平行后启动激光^[28]。

3 眼球旋转补偿法对 SMILE 手术矫正效果的影响

眼球旋转补偿在实际操作中无需额外设备,因此在临床应用中具有的优势。然而,针对旋转补偿对手术矫正效果的影响,当前仍存在一定的争议。部分研究已证明,旋转补偿可以显著改善散光的矫正效果,但也有研究未发现其对散光矫正或视觉质量的改善具有明显优势。这些差异可能与研究中采用的定位补偿方法、散光的大小、样本量等因素有关。

近期Yang等^[19]进行的系统综述和Meta分析中,研究了标准SMILE与进行旋转补偿后的SMILE手术矫正近视散光的有效性及其术后视觉质量的影响,最终纳入了4个随机对照试验和6项对照研究。结果显示,与未进行补偿的常规组相比,旋转补偿组在残余散光、等效球镜度、彗差、总高阶像差、裸眼视力、误差角等具有显著优势,而在矫正指数、成功指数、目标散光、误差量、以及球差等指标上,两组之间未发现明显差异,这表明,旋转补偿在散光矫正上具有一定的有效性和可预测性。

然而,Xu等^[2]静态眼球旋转辅助的旋转定位的方法,研究了66例132眼旋转补偿对SMILE术后矫正效果的影响,术后3 mo,两组间在视觉和屈光结果、矢量参数、全眼像差、客观视觉质量以及对比敏感度等均无统计学差异,即使在高散光亚组中,旋转补偿也没有明显获益。Sachdev等^[28]研究SMILE矫正近视散光(≥ -1.50 D)且术中旋转超过 5° 的患者30例60眼,比较了术中使用三点标记法和未使用标记法的旋转补偿效果。研究结果显示,补偿组和未补偿组的术中旋转度数分别为 $7.03^\circ \pm 1.06^\circ$ 和 $7.24^\circ \pm 0.98^\circ$,两组间未发现统计学差异。术后3 mo,等效球镜度、视力及散光矢量分析均未发现统计学差异。对于术前散光和术中旋转程度较高的眼睛,旋转补偿技术在散光结果和术后视觉质量方面未表现出额外的优势。

Chan等^[29]的研究中强调了患者体位严格控制以避免头部旋转,可显著改善SMILE散光矫正的效果。与患者头位和体位的位置相比,术中眼球旋转是导致屈光手术中总旋转误差的一个小部分,SMILE术中眼球旋转补偿未

达到预期疗效的原因,可能与手术前医师仔细检查并调整身体和头部的位位置有关^[3]。因此,手术医师在掌握眼球旋转规律及旋转补偿定位方法的同时,更需要关注中心定位、主观验光准确性和优化手术预测模型等因素对手术效果的影响。

在与不同手术方式的疗效对比研究中,Zhou等^[26]在使用人工标记的同时,结合外部标记线进行了严格的头位控制,比较SMILE与FS-LASIK矫正-2.00 D以上近视散光患者的矫正效果,术后12 mo,除了散光成功指数外,两组散光矢量分析的各个参数之间均没有统计学差异,FS-LASIK散光成功指数略高于SMILE。Zhao等^[9]通过头位调整与角膜标记线对齐,比较了波前像差引导的LASIK与SMILE在矫正高度散光时的屈光结果、高阶像差和对比敏感度。矢量分析显示,标记优化后的SMILE能够实现与波前像差引导的LASIK相似的散光矫正效果,但像差引导组在对比敏感度的改善上明显优于SMILE组。Jun等^[24]则比较了三点标记补偿法的SMILE手术与波前引导的PRK手术在矫正-2.50 D以上散光方面的临床效果、散光矢量变化及像差变化。术后6 mo结果显示,两组患者在视力、屈光和视觉效果的安全性、有效性和可预测性方面均无显著差异。

4 小结

SMILE手术对眼球旋转的定位和补偿是提升SMILE术后视觉质量的重要环节之一,随着手术的广泛开展及研究的深入,已经开发出多种眼球旋转标记方法与补偿策略,以减少眼球旋转对手术效果的影响,并取得了一定的临床成效。然而,眼球旋转补偿在改善视觉质量方面的潜力仍有待进一步验证。相信随着技术的持续创新,眼球旋转追踪控制系统的不断更新与完善,将为SMILE手术的临床应用开辟更加广阔的前景。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 侯杰论文选题与修改,初稿撰写;雷玉琳选题指导,论文修改。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Arba Mosquera S, Verma S. Effects of torsional movements in refractive procedures. *J Cataract Refract Surg*, 2015,41(8):1752-1766.
- [2] Xu JP, Liu ML, Liu Q. Outcomes of astigmatic correction with and without two different cyclotorsion compensation methods in small incision lenticule extraction surgery. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2024, 49:104272.
- [3] Prickett AL, Bui K, Hallak J, et al. Cyclotorsional and non-cyclotorsional components of eye rotation observed from sitting to supine position. *Br J Ophthalmol*, 2015,99(1):49-53.
- [4] Yoo TK, Kim D, Kim JS, et al. Comparison of early visual outcomes after SMILE using VISUMAX 800 and VISUMAX 500 for myopia: a retrospective matched case-control study. *Sci Rep*, 2024,14(1):11989.
- [5] Ganesh S, Brar S, Pawar A. Results of intraoperative manual cyclotorsion compensation for myopic astigmatism in patients undergoing small incision lenticule extraction (SMILE). *J Refract Surg*, 2017, 33(8):506-512.
- [6] Chen P, Ye YM, Yu N, et al. Comparison of small incision lenticule extraction surgery with and without cyclotorsion error correction for patients with astigmatism. *Cornea*, 2019,38(6):723-729.

- [7] Varman A, Varman A, Balakumar D. Comparison of Visual and Refractive Outcomes of Keratorefractive Lenticule Extraction for Compound Myopic Astigmatism Between VisuMax and VISUMAX 800. *Clin Ophthalmol*, 2024,30(18):3557–3566.
- [8] Köse B. Detection of and compensation for static cyclotorsion with an image-guided system in SMILE. *J Refract Surg*, 2020,36(3):142–149.
- [9] Zhao XH, Zhang L, Ma JN, et al. Comparison of wavefront-guided femtosecond LASIK and optimized SMILE for correction of moderate-to-high astigmatism. *J Refract Surg*, 2021,37(3):166–173.
- [10] Alió Del Barrio JL, Vargas V, Al-Shymali O, et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) in the correction of myopic astigmatism; outcomes and limitations – an update. *Eye Vis (Lond)*, 2017,4:26.
- [11] Alpíns N. Astigmatism analysis by the alpíns method. *J Cataract Refract Surg*, 2001,27(1):31–49.
- [12] Yang YZ, Li FF, Wu SQ, et al. Comparison of myopic astigmatic correction after cross-assisted SMILE, FS-LASIK, and transPRK. *J Cataract Refract Surg*, 2023, 49(12):1242–1248.
- [13] Febbraro JL, Koch DD, Khan HN, et al. Detection of static cyclotorsion and compensation for dynamic cyclotorsion in laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2010,36(10):1718–1723.
- [14] Neuhann IM, Lege BA, Bauer M, et al. Static and dynamic rotational eye tracking during LASIK treatment of myopic astigmatism with the Zyoptix laser platform and Advanced Control Eye Tracker. *J Refract Surg*, 2010,26(1):17–27.
- [15] Ghosh S, Couper TA, Lamoureux E, et al. Evaluation of iris recognition system for wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis for myopic astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 2008,34(2):215–221.
- [16] Zhao FK, Li L, Zhou WK, et al. Correlative factors' analysis of postural-related ocular cyclotorsion with image-guided system. *Jpn J Ophthalmol*, 2018,62(2):237–242.
- [17] Lucena AR, Mota JA, Lucena DR, et al. Cyclotorsion measurement in laser refractive surgery. *Arq Bras Oftalmol*, 2013, 76(6):339–340.
- [18] Song J, Lee H, Jung MS, et al. Simple method of measuring ocular rotation in supine position during small incision lenticule extraction. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(8):1331–1337.
- [19] Yang XW, Liu Y, Xiao KM, et al. Effect of cyclotorsion compensation in small incision lenticule extraction surgery for the correction of myopic astigmatism: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmol Ther*, 2024,13(5):1271–1288.
- [20] Khalifa MA, Ghoneim AM, Shaheen MS, et al. Vector analysis of astigmatic changes after small-incision lenticule extraction and wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43(6):819–824.
- [21] Wang BY, Wang Y, Zhang JM. Comparison of astigmatic correction with and without limbal marking during small-incision lenticule extraction. *J Cataract Refract Surg*, 2022,48(8):924–928.
- [22] Chow SSW, Chow LLW, Lee CZ, et al. Astigmatism correction using SMILE. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2019,8(5):391–396.
- [23] Liang C, Yan H. Methods of corneal vertex centration and evaluation of effective optical zone in small incision lenticule extraction. *Ophthalmic Res*, 2023,66(1):717–726.
- [24] Jun I, Kang DSY, Reinstein DZ, et al. Clinical outcomes of SMILE with a triple centration technique and corneal wavefront-guided transepithelial PRK in high astigmatism. *J Refract Surg*, 2018,34(3):156–163.
- [25] Kang DSY, Lee H, Reinstein DZ, et al. Comparison of the Distribution of Lenticule Decentration Following SMILE by Subjective Patient Fixation or Triple Marking Centration. *J Refract Surg*, 2018, 34(7):446–452.
- [26] Zhou JH, Gu W, Gao Y, et al. Vector analysis of high astigmatism (≥ 2.0 diopters) correction after small-incision lenticule extraction with stringent head positioning and femtosecond laser-assisted laser *in situ* keratomileusis with compensation of cyclotorsion. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):157.
- [27] Li FF, Yang YZ, Bao FJ, et al. Comparison of astigmatic correction with and without cross-axis alignment during small incision lenticule extraction. *J Refract Surg*, 2022,38(10):624–631.
- [28] Sachdev GS, Patekar KB, Ramamurthy S. Comparative analysis of visual outcomes following small-incision lenticule extraction with or without cyclotorsion compensation in eyes with high astigmatism: Contralateral eye study. *Indian J Ophthalmol*, 2023,71(6):2469–2473.
- [29] Chan TCY, Wang Y, Ng ALK, et al. Vector analysis of high (≥ 3 diopters) astigmatism correction using small-incision lenticule extraction and laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2018,44(7):802–810.