

自适应光学矫正 LASIK 术后眼高阶像差对视觉质量的影响

李仕明 熊 瑛 李 婧 戴 云 赵豪欣 张雨东 姜文汉 王宁利

Effects of high order aberration on visual quality in post-LASIK eyes with adaptive optics

Li Shiming, Xiong Ying, Li Jing, Dai Yun, Zhao Haoxin, Zhang Yudong, Jiang Wenhan, Wang Ningli. Beijing Tongren Eye Center, Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100730, China

Abstract Objective Present study was to analyse the effects of post-LASIK iatrogenic high order aberrations on image quality and visual function. **Methods** Adaptive optics was used for the correction of the aberrations in 12 right eyes with visual symptoms after LASIK. In a dark room, the pupils of the right eyes were dilated to 6 mm with 5 g/L phenylephedrine. Different aberration correction patterns were performed upon 6 mm pupil to measure the 100% contrast visual acuity. Modulation transfer function curve and point spread function of different aberration correction patterns were calculated based on the root mean square (RMS) of residual aberration. **Results** Compared with the static result, modulation transfer function curve and point spread function were gradually improved under the aberration correction patterns. Similar trend was found in the 100% contrast visual acuity in the subjects. After correction of the low order aberrations, the visual acuity increased by 0.031 LogMAR, showing a significant difference in comparison with stationary status ($P=0.273$). Based on the correction of low order aberrations, further correction of the 3rd order aberration increased the visual acuity by 0.079 LogMAR unit ($P=0.016$). However, the visual acuity declined by 0.018 LogMAR in correction group of the 4th order aberration compared with correction group of the 3rd order aberration ($P=0.473$). After further correction of all aberration, visual acuity enhanced by 0.047 LogMAR ($P=0.076$). **Conclusion** Correction of iatrogenic high order aberrations could improve the optical quality and high contrast visual acuity under the 6 mm pupil size and scotopic condition. The 3rd order aberration influent the visual quality obviously.

Key words adaptive optics; high order aberration; LASIK; modulation transfer function; point spread function; visual quality

摘要 目的 分析准分子激光原位角膜磨镶术(LASIK)术后医源性高阶像差对成像质量及视功能的影响。**方法** 利用自适应光学系统,对LASIK术后有视觉症状的12例患者进行像差矫正。在暗室内,采用5 g/L新福林滴眼液右眼散瞳后,实施6 mm瞳孔下像差矫正,测定100%对比度视力,计算不同像差矫正策略下的调制传递函数曲线和点扩散函数。**结果** 与静态结果相比,受试者眼调制传递函数曲线和点扩散函数逐步提高,100%对比度视力也表现出类似的趋势。在矫正低阶像差的基础上,进一步矫正三阶像差使视力提高0.079 LogMAR单位($P=0.016$)。**结论** 矫正医源性高阶像差可获得大瞳孔或暗环境下光学质量和高对比度视力的逐步提高,三阶像差对视觉质量的影响较大。

关键词 自适应光学; 高阶像差; 准分子激光原位角膜磨镶术; 调制传递函数; 点扩散函数; 视觉质量

分类号 R 778 **文献标识码** A **文章编号** 1003-0808(2009)07-0588-04

眩光、光晕或夜视力下降是准分子激光原位角膜磨镶术(laser in situ keratomiteusis, LASIK)术后患者常见的视觉症状。已有的研究表明, LASIK导致的医源

性高阶像差与这些视觉症状明显相关^[1-2]。在LASIK中,偏中心切削会造成术后的三阶像差显著增加^[3]。然而,目前尚无有力的直接证据证明,消除这些医源性高阶像差即可改善患者的视觉质量。本研究利用自适应光学系统,对有视觉症状的LASIK患者矫正其高阶像差,分析矫正前后的光学质量和视力变化,探索医源性高阶像差对视觉质量的影响。

本课题为国家自然科学基金重点项目(60438030)、国家高技术研究发展计划(863计划)基金(2006AA02Z4D2)资助

作者单位:100730 北京,首都医科大学附属北京同仁医院眼科中心(李仕明、熊瑛、李婧、王宁利);610209 成都,中国科学院光电技术研究所(戴云、赵豪欣、张雨东、姜文汉)

通讯作者:王宁利(Email:wningli@trhos.com)

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集 2008 年 6 - 10 月我科 LASIK 术后 1 个月的患者 12 例(12 眼),男女各 6 例;年龄 21 ~ 34 岁,术前的屈光度(等效球镜)为 -3.4 ~ -8.0 D,术前最佳矫正视力均 ≥ 1.0 。这些患者虽然在明亮环境下测得的视力正常,但均有眩光、光晕和夜视力下降等症状。

1.2 方法

本研究所采用的自适应光学系统其原理和精度验证已在以往研究中阐述^[4-6]。对入选的 LASIK 术后患者统一检测右眼,先给予 5 g/L 新福林滴眼液 2 滴(间隔 5 min)点眼散大瞳孔至 6 mm,30 min 后进行矫正检测。本研究中所采用的像差矫正策略为先前研究^[6]中的其中 5 种,即静态(S)、矫正低阶像差(D)、矫正低阶像差和三阶像差(C)、矫正低阶像差和三阶像差和四阶球差(E)以及全矫正像差(F),5 种像差矫正策略之间存在递进关系。每 2 种矫正策略之间间隔 1 min,重复 4 次,每 2 次重复之间间隔 5 min,以避免患者视疲劳。

1.3 统计学方法

对自适应光学系统矫正后得到的 3 ~ 35 项像差数值进行运算,获得相应的调制传递函数和点扩散函数。对受试者多次重复测量得到的视力以 $\bar{x} \pm s$ 表示,各种不同策略间测得的视力均数用 Levene 方差齐性检验证实方差齐($P = 0.20$),故不同矫正策略后获得的视力比较采用重复测试的方差分析,不同矫正策略后获得的视力的两两比较采用 LSD-*t* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同像差矫正策略后的调制传递函数

根据受试者 3 ~ 35 项高阶像差的 Zernike 系数数值计算得出调制传递函数,对所有受试者的调制传递函数取平均值得到每种矫正策略下的调制传递函数曲线。

图 1 为受试者在 6 mm 瞳孔下不同像差矫正策略的调制传递函数曲线。受试者在逐步矫正眼不同像差后,所获得的调制传递函数曲线逐步趋向衍射极限下的曲线(L),说明其光学质量在逐步提高。矫正策略 C 相比矫正策略 D 的调制传递函数曲线明显提高,矫正策略 E 的调制传递函数曲线比矫正策略 D 的调制传递函数曲线略有提高,但并不明显。

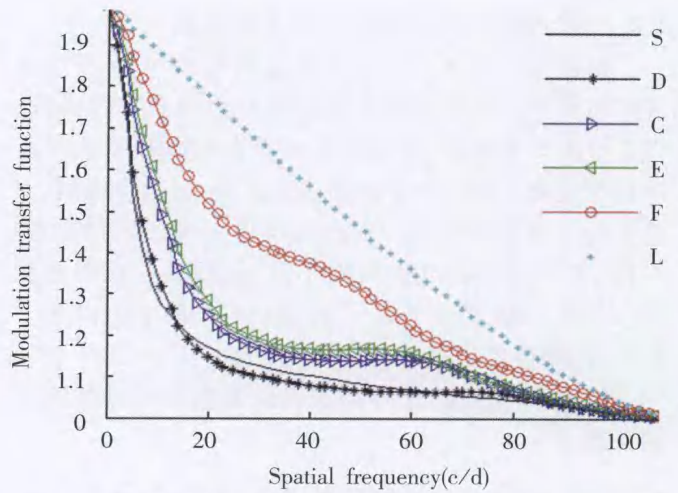


图 1 受试者在 6.0 mm 瞳孔下不同像差矫正策略后的调制传递函数曲线 S、D、C、E、F;不同的像差矫正策略 L;衍射极限情况
Fig. 1 Modulation transfer function curve of subjects under the different aberration correction patterns at 6.0 mm pupil size S, D, C, E and F; different aberration correction patterns L; diffraction limit condition

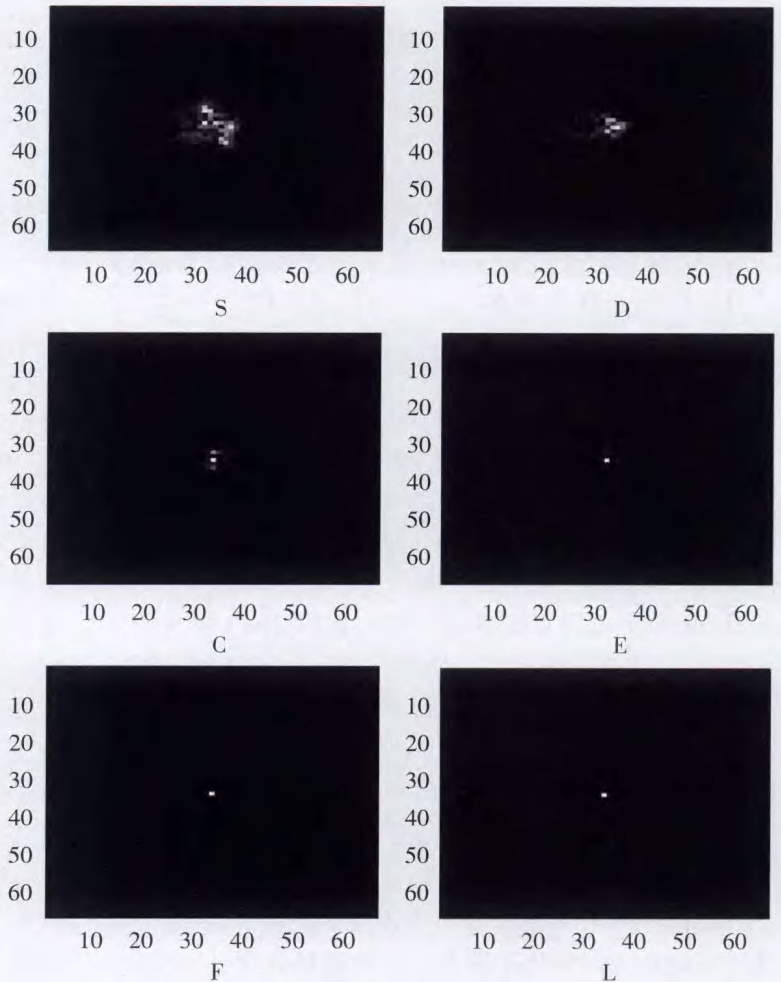


图 2 受试者在 6.0 mm 瞳孔下不同像差矫正策略后的点扩散函数 S、D、C、E、F;不同的像差矫正策略 L;衍射极限情况
Fig. 2 Point spread function of subjects under the different aberration correction patterns at 6.0 mm pupil size S, D, C, E and F; different aberration correction patterns L; diffraction limit condition

2.2 不同像差矫正策略后的点扩散函数

根据受试者 3 ~ 35 项高阶像差的 Zernike 系数值同样可计算出每种像差矫正策略后的点扩散函数。图 2 中的 S 为静态,它反映了患者在 LASIK 术后的实际视觉效果。静态 S 中的物点弥散扩大,边缘模糊,与患者的主观感受相似。随着高阶像差被逐步矫正(D ~ F),图 2 中的物点逐渐缩小,边缘锐利。在全矫像差(F)时,其物点最小,十分接近衍射极限下的物点。

2.3 不同像差矫正策略后的视力

12 例受试者的各种像差矫正策略后的具体视力值见表 1。

表 1 不同像差矫正策略下受试者的视力值
Table 1 The vision acuity of subjects under the different aberration correction patterns (LogMAR)

Patient No.	S	D	C	E	F
1	-0.07	0.02	-0.17	-0.12	-0.18
2	0.24	0.12	0.03	-0.06	0.03
3	0.23	0.12	0.06	0.22	0.05
4	0.22	0.17	-0.01	-0.02	0.08
5	0.12	-0.08	0.03	0.14	-0.04
6	-0.04	-0.04	0.04	-0.10	-0.16
7	0.07	0.03	-0.03	-0.04	-0.06
8	0.17	0.08	-0.07	0.02	-0.01
9	-0.03	-0.04	-0.07	-0.04	-0.06
10	0.04	-0.01	-0.05	-0.03	-0.07
11	-0.03	0.06	-0.14	-0.12	-0.21
12	-0.05	0.06	-0.09	-0.11	-0.18

12 例受试者在不同的像差矫正策略后,其 100% 对比度下的视力逐步提高,各种策略之间的视力测定值的差异有统计学意义 ($F = 4.494, P = 0.003$)。从静态(S)至矫正低阶像差(D),视力提高了 0.031 个 LogMAR 单位 ($P = 0.421$);进一步矫正三阶像差(C)后,与 D 相比视力又提高了 0.079 个 LogMAR 单位 ($P = 0.045$);再进一步矫正 4 阶球差(E)后,与 C 相比视力反而下降了 0.018 个 LogMAR 单位 ($P = 0.651$);全矫像差后,视力获得最佳值,与 E 相比提高了 0.047 个 LogMAR 单位 ($P = 0.227$) (图 3)。

3 讨论

人眼是一个十分复杂但并不完美的光学系统,将光学系统的调制传递函数和点扩散函数概念引入视觉科学的临床研究中,可以对影响人眼视觉质量因素的研究更加深入^[7-10]。

调制传递函数为评价光学系统成像质量的一种光学传递函数,它所反映的是不同频率的正弦强度分布

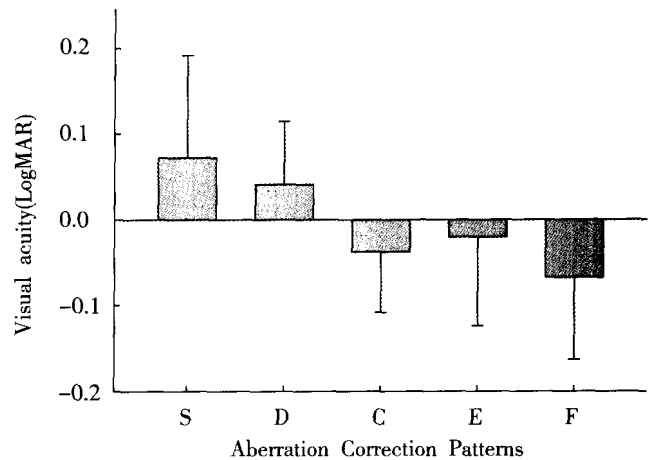


图 3 受试者在不同像差矫正策略后的视力值(LogMAR) 受试者在不同像差矫正策略后的视力值间差异有统计学意义 ($F = 4.494, P = 0.003$),不同像差矫正策略间的多重比较表明,D 较 S 提高了 0.031 LogMAR ($P = 0.273$),C 较 D 提高了 0.079 LogMAR ($P = 0.016$),E 较 C 下降了 0.018 LogMAR ($P = 0.473$),F 较 E 提高了 0.047 LogMAR ($P = 0.076$) (ANOVA, LSD-t 检验)

Fig. 3 Visual acuity of subjects under the different aberration correction patterns The visual acuity under the different aberration correction patterns shows significant difference ($F = 4.494, P = 0.003$). Compared with S, visual acuity improve by 0.031 LogMAR in D ($P = 0.273$), and C enhance by 0.079 LogMAR in comparison with D ($P = 0.016$), and E increase by 0.018 LogMAR ($P = 0.473$), F increase by 0.047 LogMAR ($P = 0.076$) (ANOVA, LSD-t test)

函数经过光学系统后,其对比度(即振幅)的衰减程度。一般来说,高频部分反映了物体的细节传递情况,中频部分反映了物体的层次传递情况,而低频部分则反映了物体的轮廓传递情况^[7]。点扩散函数是另一种基于衍射理论的评价光学系统成像质量的方法,是指一个理想的几何物点在经过光学系统后其像点的能量展开情况。在某种程度上,点扩散函数可以近似地模拟出人眼所主观感受出的物像特点^[11]。

我们研究项目的另一个课题组的前期研究发现,像差的均方根值和调制传递函数曲线都是研究屈光手术后不良症状的有效光学手段^[12]。但也有一些具有视觉症状的 LASIK 术后患者其高阶像差均方根值与正常人眼相比并无明显变化,而其调制传递函数曲线却明显下降,因此调制传递函数比高阶像差均方根值能够更有效地反映 LASIK 术后的视觉症状。通过理论计算进一步发现,在大瞳孔(5.8 mm)即暗视觉条件下,矫正三阶高阶像差对调制传递函数的影响明显,而矫正三阶像差和四阶像差对调制传递函数的影响基本相同^[12]。

本研究通过自适应光学系统实际矫正了 LASIK 术后患者 6 mm 瞳孔下的医源性高阶像差,各种像差矫正策略获得的调制传递函数曲线逐步提高。与静态 S 相比,矫正策略 C 和矫正策略 E 所获得的调制传递

函数曲线十分接近,进一步验证了在实际人眼上矫正三阶高阶像差对调制传递函数的影响明显,而再进一步矫正四阶球差后调制传递函数曲线的提高并不明显。点扩散函数也表现出了这种趋势,即在高阶像差被逐步矫正后,像点面积变小、边缘锐利。静态 S 下的像点最为弥散,反映了受试者的视觉症状,这种方法能够对 LASIK 术后具有视觉症状的患者更加形象、易懂地给以解释。

值得注意的是,单纯的光学函数并不能完全等价于人眼的视觉质量,因为人眼视网膜所获得的图像还需要经由视路传递到达大脑进行处理后才能被主观感知。本研究中对受试者所检测的 100% 对比度视力值在逐步矫正高阶像差后也获得了逐步提高,与调制传递函数及点扩散函数的变化趋势一致。矫正低阶像差和三阶像差(C)与仅矫正低阶像差(D)相比,视力提高了 0.079 个 LogMAR 单位,差异有统计学意义($P = 0.016$),这表明三阶像差在大瞳孔或暗视觉条件下对人眼视觉质量影响明显。

在进一步矫正四阶球差(E)后,受试者的平均视力比静态仍有明显提高,比矫正低阶像差和三阶像差(C)下降了 0.018 个 LogMAR 单位($P = 0.651$),但球差的标准差较大,即所能达到的最佳视力仍优于矫正策略 C。这与我们的前期研究结果略有不同,即进一步矫正球差可获得进一步的视力提高。分析其原因,可能是由于我们的前期研究为未经历过手术的正常人眼,其像差矫正目标为人眼的自身像差。有研究表明,人眼对于自身像差具有一定的神经适应性^[13]。在本研究中,所有受试者均具有主观视觉症状,其测得像差中还包括一定量的医源性高阶像差,而这些医源性高阶像差极可能干扰了从视网膜至大脑这一通路,从而使提高并不明显的光学质量难以凸现出来。

此外,虽然 12 例受试者的平均视力呈现出随着像差矫正而视力逐步提高的趋势,但具体到每个个体,则略有差异。人眼高阶像差本身就有一定的个体差异性^[14],而不同高阶像差之间又存在着复杂的相互作用^[15],残留少量的高阶像差对人眼视觉反而有益^[13]。因此,高阶像差的矫正策略应因人而异,需要矫正哪些像差,矫正多少,通过自适应光学系统进行高阶像差的验配矫正可以获得个体最佳矫正方案,这或许是将来波前像差引导的个性化屈光手术的一个发展方向。

对于波前像差引导的个性化手术来说,需要避免偏中心切削,0.1 mm 的偏中心切削即会对矫正效果产生影响,如果偏中心达到 0.3 mm 以上,影响则更为显著^[16]。但对于传统 LASIK,小于 0.5 mm 的偏中心切

削对手术后的视力和屈光度等影响不大。王铮等^[17]研究发现,散瞳后瞳孔中心平均发生(0.173 ± 0.114) mm 的偏移,最大可达 0.51 mm,根据散瞳偏移量在波前像差引导的 LASIK 术中对切削区中心做相应调整后可提高慧差的矫正效果。本研究采用了 5 g/L 的新福林滴眼液散瞳,直接在大瞳孔下把受试者的高阶像差的逐步矫正后,视力也逐步提高,为 LASIK 术后视觉质量的改善提供了直接证据,对于指导波前像差引导的个性化屈光手术具有一定的临床意义。

参考文献

- 1 Yamane N, Miyata K, Samejima T, et al. Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after conventional laser in situ keratomileusis[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2004, 45: 3986 - 3990
- 2 Chahal MR, Chavala S, Xu M, et al. Wavefront analysis in post-lasik eyes and its correlation with visual symptoms, refraction, and topography[J]. Ophthalmology, 2004, 111: 447 - 453
- 3 Moreno-Barrusio E, Lloves JM, Marcos S, et al. Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: Lasik-induced changes measured with laser ray tracing[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2001, 42: 1396 - 1403
- 4 薛丽霞, 饶学军, 王成, 等. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统[J]. 光学学报, 2007, 27: 893 - 897
- 5 李仕明, 王宁利, 李婧, 等. 自适应光学矫正眼波前像差对视锐度的影响[J]. 眼科新进展, 2008, 28: 199 - 201
- 6 Li SM, Xiong Y, Li J, et al. Effects of monochromatic aberration correction on visual acuity using adaptive optics system[J]. Optom Vis Sci, 2009, 89(6): 868 - 874
- 7 Rovamo J, Mustonen J, Nasanen R. Two simple psychophysical methods for determining the optical modulation transfer function of the human eye[J]. Vision Res, 1994, 34: 2493 - 2502
- 8 Artal P, Navarro R. Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: An analytical expression[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 1994, 11: 246 - 249
- 9 Rovamo J, Mustonen J, Nasanen R. Neural modulation transfer function of the human visual system at various eccentricities[J]. Vision Res, 1995, 35: 767 - 774
- 10 Williams DR, Artal P, Navarro R, et al. Off-axis optical quality and retinal sampling in the human eye[J]. Vision Res, 1996, 36: 1103 - 1114
- 11 姜璐, 金婉卿, 吕帆. 点扩散函数法在人眼成像质量分析中的特征[J]. 眼视光学杂志, 2008, 10: 291 - 294
- 12 刘永基, 母国光, 王肇圻, 等. 激光原位角膜磨镶术后不良症状的光学分析[J]. 光学学报, 2006, 26: 1532 - 1536
- 13 Chen L, Artal P, Gutierrez D, et al. Neural compensation for the best aberration correction[J]. J Vis, 2007, 7: 91 - 99
- 14 Porter J, Guirao A, Cox IG, et al. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2001, 18: 1793 - 1803
- 15 Applegate RASE, Khemsara V. Are all aberrations equal [J]? J Refract Surg, 2002, 18: S556 - 562
- 16 Mrochen M, Kaemmerer M, Seiler T. Wavefront-guided laser in situ keratomileusis: Early results in three eyes[J]. J Refract Surg, 2000, 16: 116 - 121
- 17 王铮, 杨斌, 黄肖虹, 等. 散瞳前后瞳孔中心偏移对波前引导准分子激光原位角膜磨镶术手术的影响[J]. 中华眼科杂志, 2005, 41: 24 - 26

(收稿:2009-03-03 修回:2009-05-22)

(本文编辑:王莉红)