

激光器与激光应用

准分子激光在屈光矫正手术中的应用

张玉亮, 张玉平, 邓国庆, 朱志强

(中科院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 简要地介绍准分子激光治疗屈光不正的手术原理及其发展历程, 着重描述了国内的研究现状和发展前景, 同时对系统中自动跟踪这一新技术的原理加以阐明。

关键词: 准分子激光; 屈光矫正; 飞点扫描; 自动跟踪

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文献编号: 1006-1231(2005)04-0034-04

Application of Excimer Laser in Corneal Surgery

ZHANG Yu-liang, ZHANG Yu-ping, DENG Guo-qing, ZHU Zhi-qiang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The principle and development of excimer laser corneal surgery were presented and its current and advanced research in China was described. Also the principle of active tracking which is a new technology in the system was illustrated.

Key words: excimer laser; diopter correction; flying-spot scanning; active tracking

1 引 言

准分子激光治疗屈光不正的有效性和安全性已经被证实, 早在 1983 年, 美国的 Trokel 和 Srinivasan 首先发现了^[1,2]193 nm 准分子激光切削角膜的切口精度高, 且对邻近组织的热损伤小等诸多优点, 提出了准分子激光与人眼角膜相互作用的光蚀模型。1986 年, 由美国食品及药物管理局 (food and drug administration, FDA) 批准的准分子激光角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK) 的研究工作分为三个阶段: 第 I 期试验为 FDA 同意 Mc Donnell 在做了效果良好的盲眼试验后, 为 10 名有部分近视的患者做 PRK, 矫正视力为 20/50 或者差些; 1989 年 3 月开始了第 II A 期试验, 矫正视力为 20/50 或者更好; 1990 年开始第 II B 期试验,

也就是临床试验, 效果很好; 1991 年开始第 III 期试验涉及 3 个眼科激光公司的 10 个子公司^[3]。1995 年美国 FDA 批准 PRK 的中、低度近视的临床应用, 1999 年通过用于高度近视、远视及散光临床治疗的准分子激光原位角膜磨镶术 (laser in situ keratomileusis, LASIK)。1999 年底美国已经有 100 万例 LASIK。我国于 1992 年引进准分子激光开展 PRK, 随后开展 LASIK。国内的中科院安徽光学精密机械研究所、东北大学和南京航空航天大学等单位对此进行了深入的研究^[4~6]。

2 手术原理

准分子激光在计算机的控制下根据近视、远视、散光度数在角膜上进行精确切削, 使角膜曲率适中, 从而光线能够直接聚焦在视网膜上, 达到屈

光矫正的目的。

2.1 视光学原理

近视、远视、散光统称屈光不正。眼睛的屈光系统大致可以看作一套复杂的多个共轴的光学元件组合。眼球在调节松弛的状态下，来自 5 m 以外的平行光线，经过眼球的屈光系统后正好聚焦在视网膜上，就是正视眼；如果聚焦在视网膜以前、以后，则形成近视，远视（见图 1）^[7~9]。散光指角膜不规则，形状上是非球面的，在医学上用来描述角膜的凹凸不平，近视和远视常伴有散光。

角膜是一层清晰的、圆顶形的薄膜，是眼睛最外层的屈光器官，其屈光度占整个眼球的 3/4，是眼屈光系统的重要组成部分。改变角膜前表面的曲率半径以矫正眼球的屈光度是一种可行且有效的办

法。准分子激光治疗屈光不正就是基于这个原理，用准分子激光在角膜表面或者基质内进行精确的刻蚀，改变角膜的曲度，从而改变术眼的屈光状态，达到屈光矫正的目的。例如角膜中央部分被切薄，使其前表面稍稍变平，可以达到凹透镜的效果从而治疗近视；如果角膜周边部分被切薄，则可以形成凸透镜的效果从而治疗远视（见图 2）。

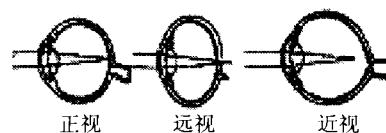


图 1 眼光线聚焦点示意图

Fig.1 Scheme of light focus in the eye

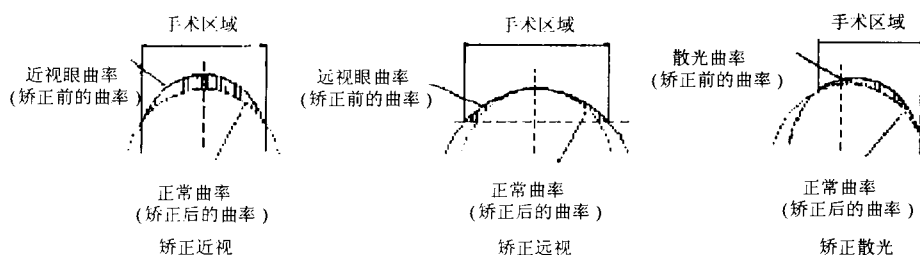


图 2 角膜屈光矫正的三种主要类型

Fig.2 Three types of dioptric correction

2.2 系统原理

准分子激光系统的原理框图如图 3 所示。

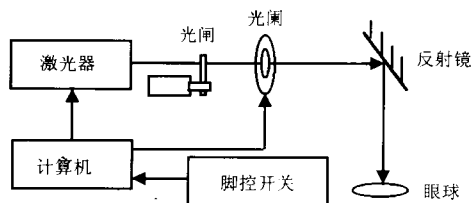


图 3 准分子激光系统原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the excimer laser system

以近视眼为例说明手术的过程。首先使准分子激光通过一个小的光阑，没有被遮住的激光就打到眼球的中央，在眼球上切削掉一层；接着使准分子激光通过一个较大的光阑，在眼球上切削掉面积较大的一层。根据计算数据依次增大光阑的直径，最终在眼球上切削掉阴影部分，使得眼球的曲率半径由 R_1 变为 $R_2 (R_2 > R_1)$ ，从而改变角膜的屈光度，使

得成像在视网膜上（见图 4）。

3 发展历程

193 nm 准分子激光器是气体脉冲激光器，气体放电存在着很大的随机性和不稳定性，这就决定了光斑的均匀度不高。目前国内外科学家正在运用各种方法来改善输出光束的质量，例如：探索新的电极型面，运用电晕预电离技术等。目前已经找到

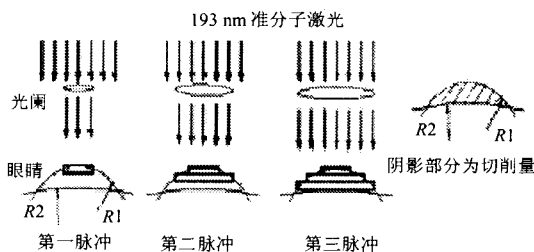


图 4 手术过程示意图（近视眼）

Fig.4 Schematic diagram of corneal surgery(myopia)

了改善激光器输出后的激光光强分布的方法^[10], 光斑的质量在不断的提高。

193 nm 准分子激光用于屈光矫正手术, 主要经历了以下两个阶段: 第一阶段为大光斑掩模式。该阶段的特点是光束能量分布不均匀、光斑面积大(约 10 mm×20 mm)、单脉冲能量大(约 200 mJ)、频率低(约 10 Hz), 主要用于治疗单纯近视眼, 且精度不高。

第二阶段为飞点扫描式。飞点扫描可以避免大光斑, 是在计算机控制下, 使激光脉冲在手术区域内按程序设定的的算法进行两维的扫描以达到角膜上特定点的方法。该阶段的特点是光斑质量高、能

量均匀分布、光斑直径小或直径可变、飞点扫描、频率高、引进各种高技术、手术时间短, 可以治疗高度近视远视及散光, 安全稳定精度高。该阶段后期引进了三维眼球主动跟踪以及波前相差等先进技术进一步提高了手术质量, 代表产品有美国 Visx 公司的 Star S4 系列准分子激光系统。

4 国内研究现状

目前国内的研究还处于第二阶段的初期阶段, 即单光斑飞点扫描式、光斑直径约 1~2 mm、频率约 100~200 Hz, 手术时间 40 s 左右, 可以治疗近视和散光。其系统原理框图如图 5 所示。

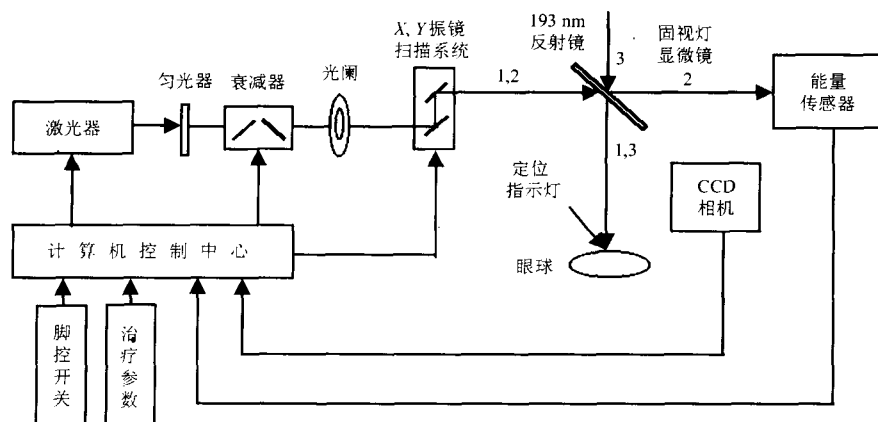


图 5 飞点扫描式准分子激光系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of flying-spot scanning excimer laser system

首先输入患者的基本参数(角膜曲率半径、近视度数等), 计算机算出切削的层数及每个光斑的坐标(X,Y), 在收到开始工作的控制信号后输出信号给激光器和振镜扫描系统, 把第 1 个脉冲打到眼

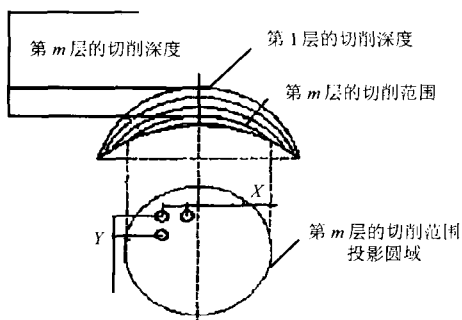


图 6 飞点扫描切削原理示意图

Fig.6 Scheme of flying-spot scanning ablation

球的预定位置上, 接着输出下一个信号, 把第 2 个脉冲打到预定的位置上, 依次打完所有的脉冲, 最终完成消融区的切削, 从而改变角膜的屈光度, 使物体成像在视网膜上, 达到屈光矫正的目的。能量传感器用来监测脉冲能量, CCD 相机跟踪眼球的运动, 即时输给计算机, 以便修正下一个脉冲打在眼球上的坐标。飞点扫描的切削原理如图 6 所示。

5 国内发展前景

目前国际上最新、最先进的准分子激光产品已经使用了包括智慧型变量光斑扫描、瞳孔中心自动定位、三维眼球主动跟踪、波前相差系统连接等众多先进技术。在国内现有的研究基础上可以进一步提高光斑质量, 缩小光斑直径至 0.65~1 mm 或者使光斑直径可变, 从单光斑飞点扫描转为多光斑

飞点扫描, 提高频率 (200~300 Hz), 利用 CCD 相机的眼球跟踪系统, 并且把角膜地形图和治疗程序有效的结合起来, 缩短手术时间 (10 s 左右), 从而更加安全可靠地治疗高度近视、远视和散光, 缩短与国际先进产品的差距。

自动跟踪系统的工作原理如图 7 所示。

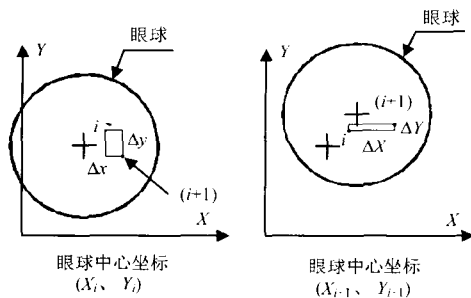


图 7 运动中的眼球上两个脉冲的相对位置

Fig.7 The relative position of two continued pulses on the moving eyeball

第 i 个脉冲打到眼球上的坐标为 (X_{pi}, Y_{pi}) , 在假定眼球不动的情况下第 $i+1$ 个脉冲与第 i 个脉冲的相对坐标为 $(\Delta x, \Delta y)$, 在第 $i+1$ 个脉冲发射前, 自动跟踪系统根据最近的两张照片, 得到眼球中心的坐标 (X_j, Y_j) 和 (X_{j+1}, Y_{j+1}) , 计算出眼球在这段时间内的平均运动速度 V_x 、 V_y 为

$$V_x = (X_{j+1} - X_j) / T \quad (1)$$

$$V_y = (Y_{j+1} - Y_j) / T \quad (2)$$

其中: V_x 为眼球在 X 方向上的移动速度; V_y 为眼球在 Y 方向上的移动速度; T 为 CCD 相机每相邻两次拍摄的时间间隔; j 为拍照序号 (与激光脉冲序号 i 不一定相等, 是距 i 最近的拍照序号); (X_j, Y_j) 和 (X_{j+1}, Y_{j+1}) 为第 j 和 $j+1$ 次拍照时眼球中心的坐标。

由此计算出第 $i+1$ 个脉冲的相对坐标为

$$\Delta X = V_x / f + \Delta x \quad (3)$$

$$\Delta Y = V_y / f + \Delta y \quad (4)$$

其中: f 为激光脉冲的频率; $(\Delta x, \Delta y)$ 为假定眼球不动的情况下第 $i+1$ 个脉冲与第 i 个脉冲的相

对坐标; $(\Delta X, \Delta Y)$ 为修正后的第 $i+1$ 个脉冲与第 i 个脉冲的相对坐标。

计算机结合跟踪系统修正光斑的坐标, 然后输出修正后的信号给振镜扫描系统和激光器, 打出第 $i+1$ 个光斑。此种方法可以大大减少由眼球的运动所带来的误差, 使得飞点扫描更加准确可靠。

6 结 论

准分子激光治疗屈光不正由于其安全可靠已经越来越广泛地被人们所接受, 并且随着准分子激光系统的不断完善和各种高技术的充分运用, 准分子激光屈光矫正手术更加精确、稳定, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Trokel S L, Srinivasan R, Braren B. Excimer Laser surgery of the cornea[J]. *Am J Ophthalmol*, 1983; **96**:710~715.
- [2] 柳林. 现代眼屈光手术学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1995.
- [3] 张金嵩. 眼屈光手术学 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1996.
- [4] 沈建新, 周儒荣, 宗仁鹤. 准分子激光与角膜组织的相互作用及在屈光矫正中的作用 [J]. 量子电子学报, 2003, **20**(5):570~575.
- [5] 邓国庆, 余吟山. 飞点扫描式准分子激光角膜屈光矫正系统 [J]. 量子电子学报, 2001, **18**(6):61~64.
- [6] 梁雅秋. 准分子激光屈光矫正理论研究 [J]. 辽宁大学学报, 2000, **27**(4):340~343.
- [7] 沈建新, 张运海, 等. 人眼角膜数学模型的研究及在屈光矫正中的应用 [J]. 生物医学工程杂志, 2003, **20**(4):695~699.
- [8] 沈建新, 胡利刚, 等. 准分子激光切削角膜的数学模型与切削技术研究 [J]. 激光生物学报, 2003, **12**(1):1~7.
- [9] 沈建新, 林振能, 等. 准分子激光切削角膜机理及其应用 [J]. 应用激光, 2003, **23**(1):41~45.
- [10] 董景星, 叶震寰, 高鸿奕, 等. 改善准分子激光光强分布的一种方法 [J]. 中国激光, 1995, **22**(12): 894~896.