文章编号:1001-5078(2017)06-0680-06

·激光应用技术 ·

一种基于飞秒激光白内障手术的碎核轨迹设计

张来峰,刘思奇,范立成,盛小明 (苏州大学机电工程学院,江苏苏州 215006)

摘 要:针对在飞秒激光辅助晶状体碎核中,需要根据白内障患者的晶状体浑浊等级选择不同的扫描方案,且其每一层的扫描轨迹不连续的问题,提出了一种参数化的螺旋形激光扫描碎核轨迹。对螺旋形扫描轨迹进行了整体参数化定义,解出了扫描轨迹的数学模型,并求解了轨迹中关键数据点的坐标值。最后对扫描轨迹数学模型建立了仿真,其仿真结果验证了所求解扫描轨迹数学模型的正确性。此种碎核方案的每一层轨迹连续,可通过改变相应参数实现不同的切割效果,为飞秒激光辅助白内障手术提供了一种新型的碎核方案,具有一定的实用价值。 关键词:飞秒激光;激光碎核;螺旋轨迹;数学模型

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.06.006

Design of lens fragmentation path based on femtosecond laser cataract surgery

ZHANG Lai-feng, LIU Si-qi, FAN Li-cheng, SHENG Xiao-ming (School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: For the traditional femtosecond laser-assisted lens fragmentation surgery, it was necessary to select different scanning solutions according to the lens opacity of the cataract patients, and the scanning path of each layer was discontinuous. In view of this problem, a parametric helical laser scanning lens fragmentation path was proposed. Firstly, the parameterized definition of the helical scanning path was given. Then, the mathematical model of the scanning path was solved and the coordinate values of the key data points in the path were solved. Finally, the simulation model of the scanning path was established, and the correctness of the mathematical model of the scanning path was verified. Simulation results show that each layer path of this lens fragmentation solution is continuous, and different cutting effects can be achieved by changing the corresponding parameters. It provides a new type of lens fragmentation solution for femtosecond laser-assisted cataract surgery, and has a certain practical value.

 $Key \ words: {\tt femtosecond} \ {\tt laser}; {\tt laser} \ {\tt lens} \ {\tt fragmentation}; {\tt helical} \ {\tt path}; {\tt mathematical} \ {\tt model}$

1 引 言

白内障是世界上排名第一的致盲眼疾病,对人 类视觉质量产生了一种巨大的威胁,而白内障手术 是全球眼科手术中最常见的手术^[1-3]。白内障手术 目前主要靠医生手工进行,术中及术后效果无法估 量。20世纪90年代以来,一种新型的超短超快激 光-飞秒激光诞生并逐渐应用于眼科领域,它辅助 的眼科手术具有更高的精度和稳定性以及更佳的手术效果,成为眼科界的一个重大创新^[4-6]。自2009 年首例飞秒激光辅助白内障手术成功以来,飞秒激 光技术的应用逐渐在眼科白内障手术领域得到了认 可^[7],使得白内障手术更为安全,并为术后效果提

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61475108)资助。

作者简介:张来峰(1989 –),男,硕士研究生,主要从事医疗机器人,CAD及CAM自动化研究。E-mail:sudalaifeng@yeah.net 通讯作者:范立成(1970 –),男,博士,副教授,主要从事机器人技术,CAD/CAM技术,机电系统设计。E-mail:flethy@126.com 收稿日期:2016-10-20

高了一个很大的层次。

飞秒激光辅助白内障手术主要包括三个方面^[8-9],即飞秒激光辅助撕晶状体前囊、辅助晶状体 碎核和辅助角膜切口制作。飞秒激光辅助晶状体碎 核的白内障手术,通过利用飞秒激光对晶状体进行 劈核和碎核处理,经过碎核处理过的晶状体再由超 声乳化装置将白内障硬核彻底震碎并吸出,然后置 换人工晶状体,继而完成整个白内障手术^[10-12]。而 传统的白内障手术则是直接利用超声乳化仪对患者 晶状体进行超声波乳化,吸出并置换人工晶状体。 与传统的超声乳化白内障手术相比,飞秒激光辅助 白内障手术有很多优势,例如经过飞秒激光处理过 的晶状体再行超声乳化术时,降低了超声乳化的有 效时间和有效超声波能量,有效减少了因超声波产 生的热效应对周围眼组织的损伤,大大降低了手术 并发症的发生,提高了手术安全性^[13-14]。

精确高效的晶状体切割离不开一个良好的术前 规划,传统的飞秒激光辅助碎核手术的激光碎核轨 迹规划,根据患者白内障的晶状体浑浊等级选择不 同的碎核方案。目前飞秒激光白内障手术主要存在 的碎核轨迹方案有同心圆形、"井"字形、"米"字形 等^[8,15],此类碎核方案的缺点是激光行走轨迹不具 有连续性,行走每一层轨迹需要不断的控制激光束 的通断,对实时性控制上产生了一定的困难。为此, 本文提出了一种新型的螺旋形扫描轨迹,其最明显 的优势就是每一层激光扫描轨迹连续,减少了激光 通断的次数。本文的工作是首先对所提出的螺旋形 扫描轨迹进行参数化的定义,对其轨迹进行整体设 计,并对所设计的螺旋轨迹建立数学模型,解出其参 数表达式,并对每一层螺旋轨迹等距点的坐标数学 模型进行了求解。工作的最后通过进行 MATLAB 仿真,得出其效果图,验证螺旋轨迹数学模型的正 确性。

2 激光扫描碎核轨迹的参数化定义

不同患者的眼组织结构信息不同,且不同患者 的晶状体浑浊等级也不尽相同,致使每一例白内障 手术用的激光碎核轨迹方案及碎核直径和深度也不 相同^[8],因此很有必要定义一种参数化的扫描轨 迹,通过改变相应的参数即可完成不同碎核轨迹的 设计。本文提出了一种等间距螺旋轨形的扫描轨 迹,不同晶状体浑浊等级只需改变螺旋的圈数即可 达到晶状体碎核的目的。定义整个扫描轨迹由下到 上每一层均为螺旋形,且为完成每一层的切割,规划 轨迹的开始第一圈是圆形轨迹,每一层螺旋形整体 效果如图1所示。



Fig. 1 The helical scanning path design of single layer

如图 2 所示,人类眼睛晶状体呈不规则的双凸透 镜状,其前后曲面为非球面^[16]。为方便扫描轨迹数 学建模并且兼顾最大范围完成晶状体碎核,定义晶状 体碎核轨迹的 *X - Z* 外轮廓视图由三段组成,两端圆 弧和中间平行线段组成一个闭合曲线,其最大直径 *D* 即是晶状体碎核直径。通过不断改变圆弧的半径大 小逐渐逼近晶状体前后面的不规则曲面,以达到最大 范围切割晶状体的目的,最终获得两端圆弧半径 *R*₁ 和 *R*₂ 的大小。因此对于不同患者的眼睛,在获得晶 状体形状位置信息后,通过表 1 中的参数即可完成图 2 所示整个扫描轨迹的参数化定义。



图 2 眼组织简图及碎核轨迹设计

Fig. 2 Eye tissue structure diagram and lens fragmentation path design

表1 碎核轨迹参数

Гаb. 1	l The	parameters	of	lens	fragmentation	path
--------	-------	------------	----	------	---------------	------

碎核直径	平行段长度	上层圆弧半径	下层圆弧半径	螺旋圈数
D	L	R_1	R_2	m

3 螺旋形扫描轨迹的数学建模

飞秒激光辅助白内障手术中,一个良好的术前 规划是整个手术成败的关键。因此在完成整个飞秒 激光碎核轨迹的参数化定义之后,需要对所定义的 激光扫描切割轨迹数学模型进行求解,以获得整个 激光螺旋扫描切割的轨迹方程,为引导激光束运动 提供必要的位置信息。

3.1 螺旋轨迹求解

如图3 所示对激光碎核轨迹外轮廓的 X - Z 视图 进行坐标系建立,坐标原点选为线段 AB 的中点处。由 图可知,轨迹的外轮廓分为上层半径为 R₁ 的AB、中层 间隔为 D 长度为 L 的平行线段和下层半径为 R₂ 的CD 三部分。将整个轨迹分为 n 层,层与层之间的间隔为 d',d' 的值由飞秒激光聚焦斑点大小和飞秒激光与眼 组织的作用原理确定^[17],为已知参数。



图 3 碎核轨迹坐标系建立

Fig. 3 The establishment of lens fragmentation path coordinate system 因轮廓曲线圆弧部分的每一层最大螺旋半径 R(z) 不同,故首先对每一层的最大螺旋半径进行求 解。由图可知 \widehat{AB} 部分的最大螺旋半径为 X 轴正半轴 部分圆弧上点的 X 坐标值,因此求得范围为0 $\leq z \leq$

$$R_{1} - \sqrt{R_{1}^{2} - \frac{D^{2}}{4}} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} \stackrel{\text{inf}}{\Rightarrow} R(z) = \sqrt{\frac{D^{2}}{4} - z^{2} - 2z} \sqrt{R_{1}^{2} - \frac{D^{2}}{4}}$$
(1)

同理可解出 \widehat{CD} 部分, 范围为 - L - R₂ + $\sqrt{R_2^2 - \frac{D^2}{4}} \le z \le -L$ 部分的最大螺旋半径为: $R(z) = \sqrt{\frac{D^2}{4} + 2(z+L)}\sqrt{R_2^2 - \frac{D^2}{4} - (z+L)^2}$ (2)

而平行线段部分的最大螺旋半径为 $\frac{D}{2}$,即范围为 – $L \leq z \leq 0$ 内的最大螺旋半径为:

$$R(z) = \frac{D}{2} \tag{3}$$

式(1) ~ (3) 中,*z* 为每一层轨迹所在的坐标值 *z*,*z* 的计算公式为:

$$z = R_1 - \sqrt{R_1 - \frac{D^2}{4}} - nd' \quad (n = 0, 1, 2, 3, \cdots)$$
(4)

其次分别对每一层的螺旋轨迹进行求解,设定 螺旋周期为 T,即每隔时间 T螺旋完成名义上的一 周,同时实时螺旋半径 R(t) 的值变化 $d,d = \frac{D}{2m}$ 为 螺旋间距。为保证每一层螺旋轨迹在 Z 方向上能够 对齐,对每一层的螺旋起始点坐标所对应的起始时 间点 t(z) 进行求解,其求解结果为:

$$r(z) = \left(\frac{D}{2} - R(z)\right) \times \frac{T}{d}$$
(5)

每一层螺旋轨迹第一圈是圆形,则 R(t) 在第一 周期 T 内保持最大螺旋半径 R(z) 不变,因此求得 R(t) 的方程表达式为:

$$R(t) = \begin{cases} R(z) & t(z) \le t \le t(z) + T \\ R(z) - \frac{d}{T} \times (t - t(z) - T) & t(z) + T \le t \le \frac{DT}{2d} + T \end{cases}$$
(6)

最终求得每一层螺旋轨迹的参数方程为:

$$\begin{aligned} x &= R(t)\cos\theta \\ y &= R(t)\sin\theta \end{aligned} \tag{7}$$

式中, $\theta = \frac{2\pi}{T} \times t_{\circ}$

3.2 螺旋轨迹等距点求解

飞秒激光与眼组织的作用原理是聚焦后的激光 斑点到达目标组织,与组织作用产生等离子体,致使 光致破裂作用的产生并迅速转化成空化气泡,当相邻 的气泡相互融合,在眼组织内生成一个分离面,产生 切割效果,而相邻气泡之间的距离即是激光脉冲斑点 之间的距离。一般来讲,斑点之间的距离越短,组织 切割表面越光滑,但是扫描时间越长,相反,距离越长 则组织表面越不光滑,但是扫描时间短,因此合理的 选择激光脉冲斑点之间的距离非常重要^[17]。然而, 不论选择何种间距,同一扫描过程中,脉冲间距是一 定的,因此需对每一层轨迹上间距相等的点坐标值进 行求解,为控制激光运动提供精确的位置信息。

一般激光斑点之间的间距代表直线的距离,而 弧长与弧所对应的弦长的长度差由式(8)表示:

$$l' = R \times \left(2\arcsin\frac{l}{2R} - \frac{l}{R}\right) \tag{8}$$

式中,*l*[']代表差值;*l*代表斑点直线距离,即弦长;*R*为 半径,一般飞秒激光白内障手术设定斑点之间最大 间隔为5 µm^[17],式(8)中斑点直线距离*l*设为 4 µm,则由图4可知在半径*R*大于8 µm 范围内长 度差的值在0.05 µm 之下,此长度差相对于斑点之 间的距离可以忽略不计,因此可用等弧长代替激光 脉冲斑点之间的距离。





因螺旋曲线的弧长的求解并不同于圆弧长的求 解,其弧长等于半径 R 与角度 θ 的积在 θ 上的积分。 因此首先对螺旋线弧长进行求解然后对整个螺旋轨 迹弧长进行求解,设每一层螺旋轨迹的弧长为l(z), 其关于 θ 的分段函数求解结果如下所示:

$$l(z) = \begin{cases} R(z) \times \left(\theta - \frac{2\pi}{T}t(z)\right) & \theta_0 \le \theta \le \theta_1 \\ \\ 2\pi R(z) + R(z)\theta' - \frac{d}{4\pi}\theta^2 & \theta_1 \le \theta \le \theta_2 \end{cases}$$
(9)

式中,
$$\theta' = \theta - \left(\frac{2\pi}{T}t(z) + 2\pi\right), \theta_0 = \frac{2\pi}{T}t(z), \theta_1 = \frac{2\pi}{T}t(z) + 2\pi, \theta_2 = \frac{TD}{2d}$$
。

设定螺旋轨迹上第 n 个等距点所对应的角度为 $\theta(n)$,点与点之间的等弧长距离为 d_0 ,固有 $l(z) = n \cdot d_0$,因此求得 $\theta(n)$ 的值为:

$$\theta(n) = \begin{cases} n \cdot \frac{d_0}{R(z)} + \frac{2\pi}{T} t(z) & nd_0 \le 2\pi R(z) \\ \frac{\pi}{d} \cdot a + \frac{2\pi}{T} t(z) + 2\pi & 2\pi R(z) \le nd_0 \end{cases}$$
(10)

式中:

$$a = \left(2R(z) - \sqrt{4R(z)^2 - \frac{4d \cdot (nd_0 \cdot 2\pi R(z))}{\pi}}\right),$$

n 为第 n 个等距点。

故最终求得每一层螺旋轨迹在直角坐标系下的 每一个等距点的坐标值的数学模型如下:

$$\begin{cases} x_n = R(t)\cos\theta(n) \\ y_n = R(t)\sin\theta(n) \end{cases}$$
(11)

4 数学模型仿真验证

由文献[16]得知,人眼晶状体前面的曲率半径大约为10mm,后面约为6mm,晶状体厚度约5mm,因此结合传统飞秒激光白内障手术,获得晶状体碎核激光

扫描轨迹的参数如表 2 所示,用 MATLAB 对所设计的 激光扫描轨迹的数学模型进行仿真验证。

表2 碎核轨迹具体参数值

Tab. 2 Specific parameter values of lens

fragmentation path

碎核直径	平行段长度	上层圆弧半径	下层圆弧半径	螺旋圈数
D = 4.5 mm	L = 2 mm	$R_1 = 9 \text{ mm}$	$R_2 = 5 \text{ mm}$	<i>m</i> = 5

螺旋轨迹建模结果如图5所示。







(e)



图 5 MATLAB 仿真结果 Fig. 5 MATLAB simulation results

图 5(a) 为中间层其中一层仿真结果,其最大螺 旋半径为 4.5 mm,且第一圈为圆形,螺旋圈数为 5 圈。图 5(b) 为上层圆弧某一层仿真结果,可看出 其螺旋起始点与图 5(a) 不同,并且其最大螺旋半径 小于 4.5 mm,螺旋圈数小于 5 圈,与数学模型形成 对应。图 5(c) 为轨迹整体的 *X* – *Z* 视图,可看出图 形的外轮廓与图 2 所设计的扫描轨迹外轮廓相一 致。图 5(d)为整体轨迹的 X - Y视图,可看出其隔 层螺旋曲线在 Z 方向上保持对齐,呈现明显的螺旋 效果。图 5(e)为整体轨迹的三维视图,亦可明显看 出螺旋轨迹。图 5(f)为单层螺旋轨迹上等距点的 求解结果,为方便肉眼能够识别等距效果,设定斑点 之间的间隔距离为 0.5 mm。

5 结 论

本文在目前飞秒激光辅助白内障手术的大趋势下,分析飞秒激光白内障手术辅助晶状体碎核的激光扫描轨迹方案,针对现有方案轨迹不连续等缺点,提出了一种新型等间距的螺旋形激光碎核轨迹,并进行了参数化定义,根据所提供的参数解出了每一层及整体螺旋轨迹的数学模型,对其进行了 MATLAB 仿真验证,验证结果表明通过改变其相应的参数即可实现不同的螺旋效果,并且仿真结果表明所设计的螺旋轨迹以及所解出的数学模型的正确性,为控制激光束运动实现扫描碎核作出了理论性的铺垫,且螺旋形轨迹优势明显,具有一定的实用价值。

参考文献:

- Patil S, Gogate P, Vora S, et al. Prevalence, causes of blindness, visual impairment and cataract surgical services in Sindhudurg district on the western coastal strip of India [J]. Indian Journal of Ophthalmology, 2014, 62 (2): 240-245.
- [2] Trikha S, Turnbull A M J, Morris R J, et al. The journey to femtosecond laser-assisted cataract surgery: new beginnings or a false dawn? [J]. Eye, 2013, 27 (4): 461-473.
- [3] Mcalinden C, Jonsson M, Kugelberg M, et al. Establishing levels of indications for cataract surgery: combining clinical and questionnaire data into a measure of cataract impact[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2012,53(3):1095-1101.
- [4] Kurtz R M, Horvath C, Liu H H, et al. Lamellar refractive surgery with scanned intrastromal picosecond and femtosecond laser pulses in animal eyes[J]. Journal of Refractive Surgery, 1998, 14(5):541-548.
- [5] Lee J K, Chuck R S, Park C Y. Femtosecond laser refractive surgery: small-incision lenticule extraction vs. femtosecond laser-assisted LASIK[J]. Current Opinion in Ophthalmology, 2015, 26(4):260 – 264.
- [6] WANG Yawei, LIU Ying, BU Min, et al. Mechanisms of femtosecond laser interaction with biological tissues and

its applications [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1):7 - 10. (in Chinese)

王亚伟,刘莹,卜敏,等. 飞秒激光与生物组织作用原 理及其应用[J].激光与红外,2008,38(1):7-10.

- [7] Nagy Z, Takacs A, Filkorn T, et al. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery
 [J]. Journal of Refractive Surgery, 2009, 25(12):1053 1060.
- [8] Nagy Z Z, Mcalinden C. Femtosecond laser cataract surgery[J]. Eye & Vision, 2015, 2(1):1-8.
- [9] WANG Hui. Application of femtosecond laser in cataract surgery[J]. Journal of Tianjin Medical University, 2013, 19(5):433-435. (in Chinese)
 王辉. 飞秒激光在白内障手术中的应用进展[J]. 天津 医科大学学报, 2013, 19(5):433-435.
- [10] Roberts T V, Lawless M, Bali S J, et al. Surgical outcomes and safety of femtosecond laser cataract surgery: a prospective study of 1500 consecutive cases [J]. Current Medical Literature Ophthalmology, 2013, 120 (2): 227-233.
- [11] He L, Sheehy K, Culbertson W. Femtosecond laser-assisted cataract surgery [J]. Current Opinion in Ophthalmology, 2011, 22(1):43 - 52.
- [12] LIU Yizhi. Femtosecond laser-assisted cataract surgery

[J]. ChineseJournal of Ophthalmology, 2014, 50(2):158
-160. (in Chinese)
刘奕志. 飞秒激光辅助白内障手术[J]. 中华眼科杂

志,2014,50(2):158-160.

- [13] Abell R G, Mbchb N M K, Franzco B J V. Femtosecond laser-assisted cataract surgery compared with conventional cataract surgery[J]. Clinical & Experimental Ophthalmology, 2013, 41(5):455-462.
- [14] Abell R G, Kerr N M, Vote B J. Toward zero effective phacoemulsification time using femtosecond laser pretreatment[J]. Ophthalmology, 2013, 120(5):942-948.
- [15] Grewal D S, Schultz T, Basti S, et al. Femtosecond laser assisted cataract surgery-current status and future directions [J]. Survey of Ophthalmology, 2016, 61(2):103.
- [16] XU Xiuying. Parametric 3D modeling and visualization of human crystalline lens[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006. (in Chinese) 徐秀英. 人眼晶状体的参数化建模与可视化[D]. 厦 门:厦门大学,2006.
- [17] WANG Yan, ZHAO Kanxing. Refractive surgery with femtosecond laser[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2014. (in Chinese)
 王雁,赵堪兴. 飞秒激光屈光手术学[M]. 北京:人民 卫生出版社, 2014.