

长工作距的 3D 变倍外视镜光学系统设计

曹钟予, 向阳*

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对现有显微外科手术中内窥镜工作距离短、不能实现光学变倍、无法获得立体图像的问题, 提出了长工作距、可变档变倍的双光路 3D 外视镜光学系统设计方案, 其中单条光路由前后两组变焦系统组成, 前变焦组子系统采用光学补偿的三组元式结构, 其作用是实现工作距离、物方视场可变的同时保持出射光线平行; 后变焦组子系统采用机械补偿的四组元式结构, 其作用是接收前组子系统的平行光并保持像面位置及像高不变, 组合而成的整体光学系统共有三个运动组元, 通过三组联动的形式可达到变倍效果, 该方案类比于筒长无限的显微镜, 中间光路平行使得安装方便且可灵活插入分光器件, 并推导了前变焦组子系统焦距与物方工作距离的关系方程, 依据选定像元数为 1920×1200 、像元尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ 的高清 CMOS, 优化设计了物方分辨率为 $6.8 \sim 31.8 \mu\text{m}$ 、物方视场范围为 $\Phi 15 \sim \Phi 70 \text{ mm}$ 、工作距为 $180 \sim 380 \text{ mm}$ 、整体缩小倍率 $1/\beta$ 可实现分别为 $1.36 \times$ 、 $2.36 \times$ 、 $3.36 \times$ 、 $4.36 \times$ 、 $5.36 \times$ 以及 $6.36 \times$ 的六个档位变化的 3D 外视镜光学系统。通过给定合理的公差范围, 仿真结果表明, 六档倍率情况下的光学系统调制函数在 105 lp/mm 空间频率处优于 0.15 概率达到 90% 以上, 变倍凸轮曲线平滑无拐点, 可满足显微外科手术要求。

关键词: 光学设计; 外视镜; 变焦系统; 显微外科手术

中图分类号: TH773 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210808

Design of a 3D zoom exoscope optical system with a long working distance

Cao Zhongyu, Xiang Yang*

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In conventional microsurgery, the existing endoscope has the problem of a short working distance, is unable to achieve optical zoom, and is unable to obtain stereo images. Therefore, the design scheme of a two-path configuration 3D exoscope optical system with a long working distance and optical zoom features is proposed. The single optical path is composed of the front zoom system and the rear zoom system. The front zoom group system selects the three-element structure of optical compensation, and its function is to realize variable working distance and variable field of view while keeping the output light parallel. The rear zoom group system selects the four-element structure of mechanical compensation, and its function is to receive the parallel light of the front group system and keep the image plane position and image height unchanged. The combined optical system can achieve a zoom effect through the form of three moving group linkages. This solution is analogous to a microscope with infinite tube length. The parallel light path in the middle makes it easy to install and flexibly insert the beam splitter. Furthermore, the relation equation between the focal length of the front zoom system and

收稿日期: 2021-11-01; 修订日期: 2021-12-07

作者简介: 曹钟予, 女, 硕士生, 主要从事光学设计和显微成像方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 向阳, 男, 教授, 硕士, 主要从事光学镜头设计以及光学检测设备的研究。

the working distance of the object is derived. Based on the high-definition CMOS with a pixel number of $1\ 920 \times 1\ 200$ and a pixel size of $4.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$, we design a six-switched 3D exoscope optical system. The object resolution of the system is $6.8\text{--}31.8\ \mu\text{m}$, the object field of view is $15\text{--}70\ \text{mm}$, the working distance is $180\text{--}380\ \text{mm}$, and the demagnification $1/\beta$ is $1.36\times, 2.36\times, 3.36\times, 4.36\times, 5.36\times, 6.36\times$. By selecting a reasonable tolerance range, the design results show that the six-switched optical system MTF is better than 0.15 at 105 lp/mm with a probability of more than 90%, and the cam curve is smooth, which can meet the requirements of microsurgery.

Key words: optical design; exoscope; zoom system; microsurgery

0 引言

现有国内外用于显微外科手术中的主要设备包括内窥镜和手术显微镜,由于内窥镜的工作距离较短,一般为 $3\text{--}20\ \text{mm}$,在用其观察病灶的过程中,血液以及病灶周围的组织会阻碍内窥镜的视野,而且内窥镜一般不具备光学变倍的功能以调节物方视场大小,其获得的图像常为 2D 图像,失去景深信息对外科医生的判断也会有所影响。手术显微镜能够在某些情况下替代内窥镜,其工作距离为 $200\text{--}400\ \text{mm}$,但它的体积庞大,质量可达 $225\ \text{kg}$ 以上,占据较大的空间会阻碍医护人员的行动,而且医生需长时间伏在手术显微镜的目镜上进行手术,这会导致医生出现不适感,降低手术效率^[1-3]。国外近几年研制出外视镜用以解决上述问题,外视镜是由外视镜光学系统、光源系统、气动机械臂、高清视频显示器组成的新型显微光学手术设备,它可以代替内窥镜从狭小的创口处观察病灶,其功能与手术显微镜相同^[4-6],外视镜无需目镜,可直接将物体成像至图像传感器上,因此外视镜可实现小型化设计。

2008 年, Mamelak 等人将卡尔史托斯制造的 2D 外视镜设备用于给活猪进行显微外科解剖实验,外视镜前端的镜头焦距为 $200\ \text{mm}$,其物方视场范围与手术显微镜均等^[7],但其工作距离较小且缺乏立体感。Sack 等人在 2017 年用奥林巴斯制造的 3D 外视镜进行临床实验,该款 3D 外视镜变焦比为 $1\text{--}12$ 倍(光学 6 倍、数字 2 倍),物方视场直径范围为 $7.5\text{--}171\ \text{mm}$ ^[8],但其前端镜头口径很大且成本高。国内对外视镜系统的研究还没有报道。

基于现有研究现状分析,文中设计了一种小型化、长工作距的 3D 变倍外视镜光学系统,主要由三组元光学补偿形式的前变焦组子系统和四组元机械补偿形式的后变焦组子系统组成。设计结果表明,该

系统能够通过调节六个变倍档位实现工作距离和物面视场范围可变的效果,具有长工作距、小型化的特点,可匹配不同手术情况要求,便于医生精确判断病灶位置,提高了医生的工作效率,在显微外科手术领域中具有重要意义。

1 设计原理

3D 外视镜光学系统成像原理图如图 1 所示,该系统采用设置两条相同光路的方式,从左右两个不同角度对同一物体成像至互相平行放置的双图像传感器上,并获得两个图像,其中单条光路的光学系统由逆向光路的照相物镜式前变焦组子系统和正向光路的照相物镜式后变焦组子系统组成,将被观测物体置于前变焦组子系统物方焦点处,经过前变焦组光学系统后以平行光出射,该平行光再经过后变焦组光学系统成像至图像传感器上,该系统可通过调节前变焦组子系统的变倍组 Δa 、后变焦组子系统的变倍组 Δb 和补偿组 Δc 的位置以实现工作距离和物面视场均可变化。采用前后两组变焦子系统组合方案的目的一是类比筒长无限的显微镜,系统倍率为前后两组子系统焦距之比,中间光路平行设计使得安装方便以及可灵活插入分光器件;二是由于外视镜的工作距离较长且需变化,常规的变焦显微镜工作距离较短且固定,分为前后两组变焦子系统设计,前变焦组子系统可分担当长工作距离、大视场均可变的工作,同时保持出射光线平行,而后变焦组子系统可保持像面位置以及像高不变,并接收前变焦组子系统的平行光,两组相互配合实现变倍。为实现 3D 效果,可采用时分制立体显示系统对左右两个图像传感器获得的两组图像进行处理,并将处理后的两组图像接入带有液晶调制屏的显示器轮流显示,同时液晶调制屏需跟随左右两组不同图像的显示状态调整为两种偏振模式,医生可佩戴偏振眼镜观看显示屏以获得立体图像^[9]。

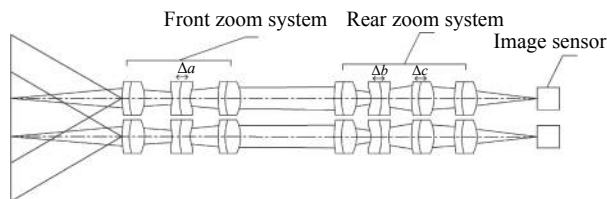


图 1 3D 外视镜光学系统成像原理图

Fig.1 Imaging principle of 3D exoscope optical system

图 2 所示为单光路的 3D 外视镜变倍光学系统示意图, 图中前变焦组为三组元式, 1 为前变焦组子系统的前固定组, 2 为前变焦组子系统的变倍组, 3 为前变焦组子系统的后固定组, 前变焦组子系统采用光学补偿实现变焦, 2 为移动组元, 做线性运动。图中后变焦组为四组元形式, 4 为后变焦组子系统的前固定组, 5 为后变焦组子系统的变倍组, 6 为后变焦组子系统的补偿组, 7 为后变焦组的后固定组, 后变焦组子系统采用正组机械补偿实现变焦, 5 和 6 为移动组元, 5 做线性运动, 6 做非线性运动, 由前后两个变焦子系统组合而成的单光路的 3D 外视镜变倍光学系统共有 2、5、6 三个运动组元, 需将三组联动即可实现变倍变焦效果^[10]。

图 3 所示为前变焦组的高斯光学系统结构图, 它

由正光焦度、负光焦度、正光焦度的三个理想透镜组元构成, 其中第一组元 1 为前变焦组子系统的前固定组, 第二组元 2 为前变焦组子系统的变倍组, 第三组元 3 为前变焦组子系统的后固定组。

第一组元 1 和第二组元 2 的垂轴放大率分别为^[11]:

$$\beta_1 = \frac{f_1'}{x_1} = -\frac{\Delta_1 + z + x_2}{f_1'} = \frac{(\Delta_1 + z)(\Delta_2 - z) - f_2'^2}{f_1'(z - \Delta_2)} \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{f_2'}{x_2} = -\frac{\Delta_2 - z}{f_2'} \quad (2)$$

式中: f_1' 、 f_2' 分别为第一组元 1 和第二组元 2 的焦距; Δ_1 为第一组元 1 和第二组元 2 之间的间隔; Δ_2 为第二组元 2 和第三组元 3 之间的间隔; z 为第二组元 2 移动的距离; x_1 为实际物点到第一组元 1 物方焦点的距离; x_2 为实际物点经过第一组元 1 所成的像点到第二组元 2 物方焦点的距离。

前变焦组的系统焦距为:

$$f_F'(z) = -\frac{h_3}{u_1} = -\frac{h_3 u_3 u_2}{u_3 u_2 u_1} = f_3' \frac{1}{\beta_2 \beta_1} = \frac{f_1' f_2' f_3'}{\Delta_1 \Delta_2 - f_2'^2 + z(\Delta_2 - \Delta_1) - z^2} \quad (3)$$

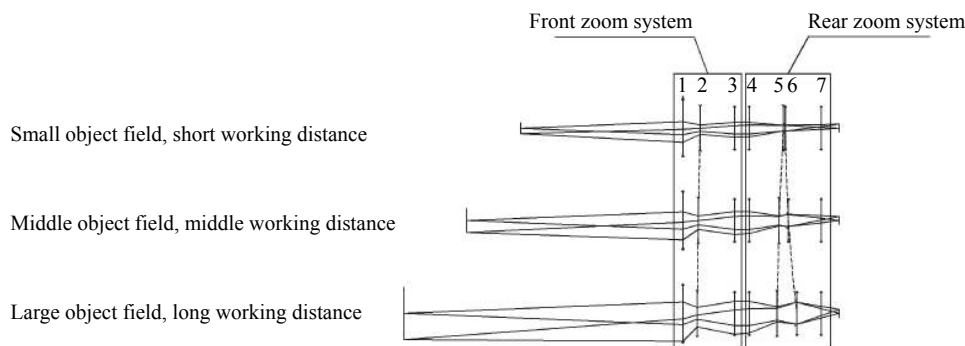


图 2 单光路的 3D 外视镜变倍光学系统示意图

Fig.2 Schematic of 3D exoscope optical system with single optical path

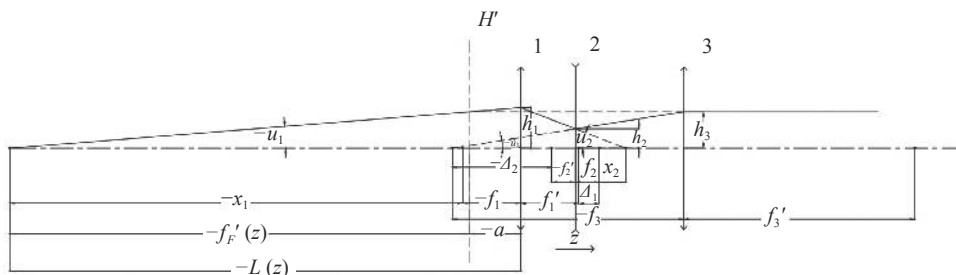


图 3 前变焦组的高斯光学系统结构图

Fig.3 Structure of Gaussian optical system in front zoom group

式中： h_1 、 h_2 、 h_3 分别为轴上物点发出的最边缘光线到每一组元的入射高度； u_1 、 u_2 、 u_3 分别为每一组元的入射光线与光轴之间的孔径角； f_3' 为第三组元 3 的焦距。

前变焦组的系统变焦比^[12]：

$$M_1 = \frac{f_F'(0)}{f_F'(z)} \quad (4)$$

式中： $f_F'(0)$ 为前变焦组中 $z=0$ 时的系统焦距。

工作距离 $L(z)$ 与前变焦组系统焦距 $f_F'(z)$ 之间的关系为：

$$L(z) = f_F'(z) + a \quad (5)$$

式中： a 为前变焦组系统像方主面到第一组元 1 之间的距离。在理想情况下，前变焦组的工作距离与系统焦距成正比关系。

图 4 所示为后变焦组的高斯光学系统结构图，它由正光焦度、负光焦度、正光焦度、正光焦度的四个理想透镜组元构成，其中第四组元 4 为后变焦组子系统的前固定组，第五组元 5 为后变焦组子系统的变倍组，第六组元 6 为后变焦组子系统的补偿组，第七组元 7 为后变焦组子系统的后固定组。

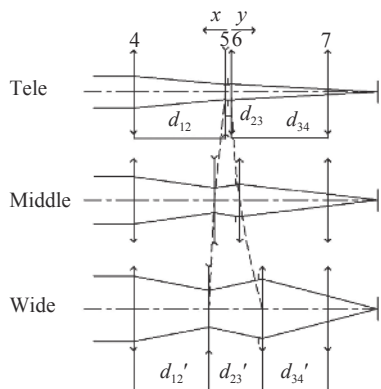


图 4 后变焦组的高斯光学系统结构图

Fig.4 Structure of Gaussian optical system in rear zoom group

第五组元 5 和第六组元 6 的初始垂轴放大率：

$$\beta_5 = \frac{f_5'}{f_5' + f_4' - d_{12}} \quad (6)$$

$$\beta_6 = \frac{f_6'}{f_6' + f_5'(1 - \beta_5) - d_{23}} \quad (7)$$

式中： f_4' 、 f_5' 、 f_6' 分别为第四组元 4、第五组元 5 以及第六组元 6 的焦距； d_{12} 为第四组元 4 和第五组元 5 之间的初始间隔； d_{23} 为第五组元 5 和第六组元 6 之间的初始间隔。

变焦过程中，第五组元 5 和第六组元 6 的垂轴放大率^[13]：

$$\beta_5' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_5} - \frac{x}{f_5'}} \quad (8)$$

$$\beta_6' = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (9)$$

式中： $b = -\frac{f_5'}{f_6'} \left(\frac{1}{\beta_5'} - \frac{1}{\beta_5} + \beta_5' - \beta_5 \right) + \left(\frac{1}{\beta_6} + \beta_6 \right)$ ； $x = f_5' \cdot \left(\frac{1}{\beta_5} - \frac{1}{\beta_5'} \right)$ 为第五组元 5 的移动量。

第六组元 6 的移动量：

$$y = f_6' (\beta_6' - \beta_6) \quad (10)$$

变焦过程中，第四组元 4、第五组元 5 以及第六组元 6 之间的各个空气间隔：

$$d_{12}' = d_{12} + x \quad (11)$$

$$d_{23}' = d_{23} - x - y > 0 \quad (12)$$

$$d_{34}' = d_{34} - y \quad (13)$$

后变焦组系统焦距：

$$f_R' = f_4' \beta_5 \beta_6 \quad (14)$$

后变焦组系统的变倍比：

$$M_2 = \frac{(\beta_5' \beta_6')_{\max}}{(\beta_5 \beta_6)_{\min}} \quad (15)$$

2 设计实例

2.1 系统参数计算

根据实际显微外科手术要求，设计了一款高分辨率、小型化、长工作距的 3D 变倍外视镜光学系统，系统选用型号为 MV-SUA202 GC-T 的 2/3" 高清 CMOS，其像元尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ ，图像分辨率为 1920×1200 ，全像高设为 11 mm，物面直径范围要求为 15~70 mm，根据垂轴放大率公式可计算出系统倍率范围：

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{5.5}{7.5} \sim \frac{5.5}{35} = \frac{1}{1.36} \sim \frac{1}{6.36} \quad (16)$$

式中： y' 表示像高； y 表示物高。

光学系统分辨率由成像至图像传感器的像元尺寸决定。由公式 (17) 可计算出该光学系统像方分辨率为^[14]：

$$\delta' = \delta \beta \leq 2\Delta = 9.6 \mu\text{m} \quad (17)$$

式中： δ 为物方分辨率； Δ 为像元尺寸。根据公式 (17) 可知，像方分辨率越高会使得物方分辨率也越高，考

虑加工、装调等外在因素对成像质量的影响,并结合实际需求,设定 δ' 为 5 μm ,根据显微镜分辨率公式:

$$\delta' = \frac{0.61\lambda}{NA'} \quad (18)$$

式中:波长 λ 设为 0.588 μm ,可知像方数值孔径 $NA' \approx 0.07$ 。根据公式 (17) 可求得物方分辨率 δ 为 6.8~31.8 μm ,文中光学系统主要设计指标要求如表 1 所示。

表 1 系统参数指标

Tab.1 System design parameters	
Parameter	Value
Working distance/mm	180-380
Object space NA	0.011-0.052
Wavelength/ μm	0.486-0.656
Magnification	1/1.36 \times -1/6.36 \times
Object height/mm	2 y =15-70
Total length/mm	≤ 350
MTF	105 lp/mm ≥ 0.2

2.2 前变焦组光学系统设计

文中设计的 3D 外视镜单条光路的光学系统由前后两组变焦子系统组成,需将前后两组变焦子系统分开设计。前变焦组光学系统需采用反向光路设计,即平行光入射,经过前变焦组光学系统后成像。前变焦组光学系统参数指标如表 2 所示,光学补偿变焦结构一般适用于相对孔径较小的光学系统,由于前变焦组光学系统像方 F 数较大,初始结构选用三组元式光学补偿的变焦系统,这种变焦系统结构简单,机械加工较为容易^[15-16]。

表 2 前变焦光学系统参数指标

Tab.2 Front zoom system design parameters	
Parameter	Value
Back focal length/mm	180-380
Image space $F\#$	9.5-44
Wavelength/ μm	0.486-0.656
Front zoom system focal length/mm	200-400
Image height/mm	2 y' =15-70
Object field of view/($^\circ$)	4.3-10

根据前变焦组光学系统参数指标,按比例对初始结构进行焦距缩放,并在多重结构编辑器中对各组元

之间的空气间隔给定了不同的数值,设定了焦距不同的六个组态,同时对系统中产生较大像差的镜片将其曲率和厚度为设变量,采用设定合理优化操作数替换玻璃材料以及增加或删除镜片的方式对系统进行优化设计。图 5 所示为第一组态焦距 200 mm 和第六组态焦距 400 mm 的前变焦组光学系统结构图,其中后固定组为一个正光焦度的双胶合透镜;变倍组由一个负光焦度的胶合透镜和一个正光焦度的单透镜组成;前固定组由三个单片透镜以及一个双胶合透镜组成,以更好地矫正残余像差;孔径光阑放在变倍组与前固定组之间,其目的是为减小垂轴像差。

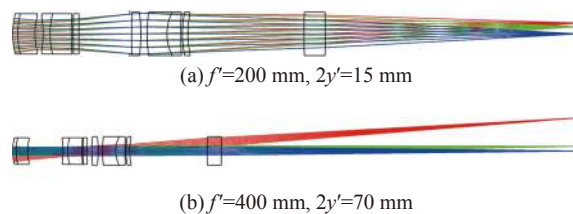


图 5 前变焦组光学系统结构图

Fig.5 Optical system structure of front zoom group

2.3 后变焦组光学系统设计

前变焦组子系统各组态出射的平行光角度以及出瞳位置不同,因此后变焦组需根据系统整体缩小倍率以及前变焦组子系统的参数进行匹配设计,后变焦组光学系统参数指标要求如表 3 所示。

表 3 后变焦光学系统参数指标

Tab.3 Rear zoom system design parameters	
Parameter	Value
Image space $F\#$	7
Wavelength/ μm	0.486-0.656
Rear zoom system focal length/mm	63-147
Image height/mm	2 y' =11
Object field of view/($^\circ$)	4.3-10
Back focal length/mm	≥ 15

根据后变焦组光学系统的指标设计了后变焦组子系统,在优化后变焦组过程中,也需设定焦距不同的六个组态,图 6 所示为第一组态焦距为 63 mm 和第六组态焦距为 147 mm 的后变焦组光学系统结构图,其中前固定组由光焦度均为正的一个双胶合以及单片透镜组成;变倍组由光焦度均为负的单片透镜以及

一个双胶合透镜组成;补偿组由两个正光焦度双胶合透镜组成;后固定组由三个正光焦度的单片透镜以及一个负光焦度单片透镜组成,其采用较多镜片是为更好地校正前三组元带来的剩余像差;孔径光阑设在变倍组以及补偿组中间。

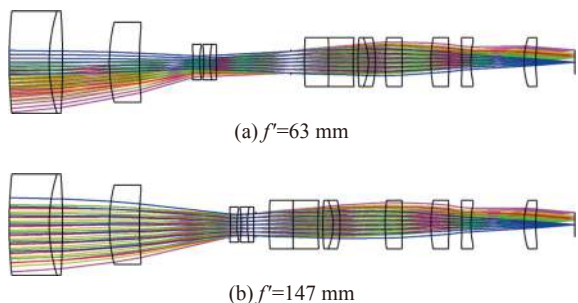


图 6 后变焦组光学系统结构图

Fig.6 Optical system structure of rear zoom group

2.4 3D 变倍外视镜光学系统设计及像质分析

遵循光瞳衔接原则,将前变焦组子系统和后变焦组子系统组合为单光路的 3D 变倍外视镜光学系统。前变焦组子系统需在设计软件中沿 y 轴进行 180° 翻

转,并将其六个组态与后变焦组子系统的六个组态逐一对应,通过设置合理的优化操作数以及调整孔径光阑位置对系统进行整体优化,最终设计结果满足系统参数要求。图 7 所示为不同缩小倍率及工作距离下的光学系统结构图,系统前后变焦两组子系统均属于内变焦模式,在变倍过程中光学总长不变,其光学总长为 345 mm,后截距为 15 mm,最大的通光半口径为 20 mm,镜片采用性价比高的全球面,未引入非球面等其他复杂面型,这不仅可以降低成本,同时也便于加工与安装。

图 8 所示为该光学系统的调制传递函数 (MTF) 曲线图,从图中可知六个组态的全视场的设计结果在截止频率为 105 lp/mm 处均优于 0.2,成像质量良好,满足图像传感器的分辨率要求。

图 9 所示为该系统的场曲和畸变图,纵坐标为系统设定视场的大小,横坐标分别代表场曲和畸变的实际值,由图中可知,所设计的光学系统六个组态下的场曲值均优于 0.2 mm,畸变均优于 0.2%。

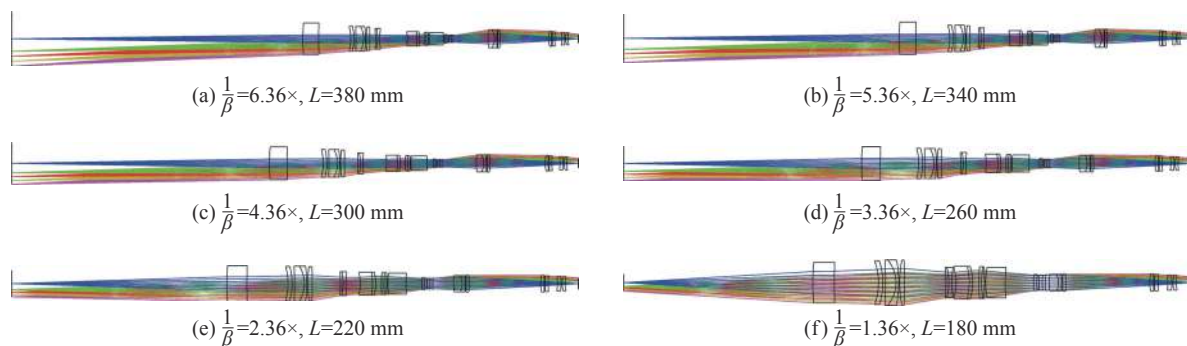
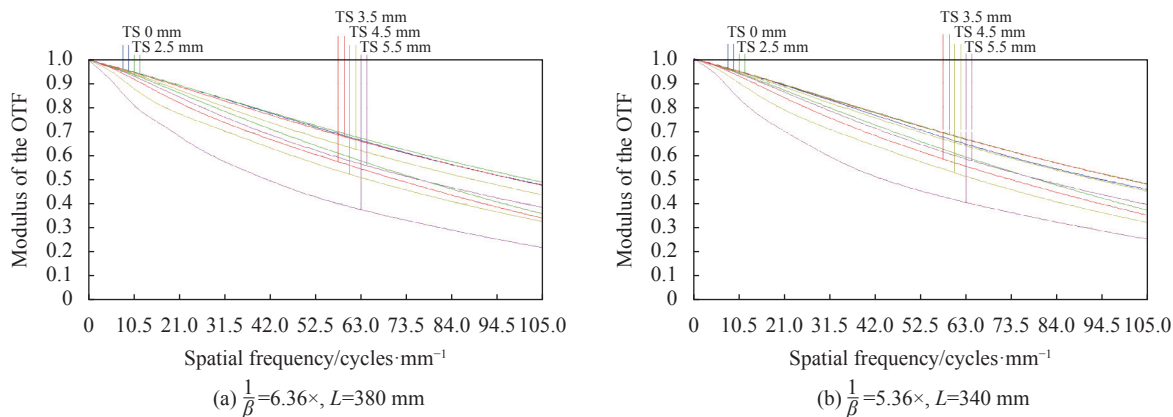


图 7 光学系统结构图

Fig.7 Optical system structure



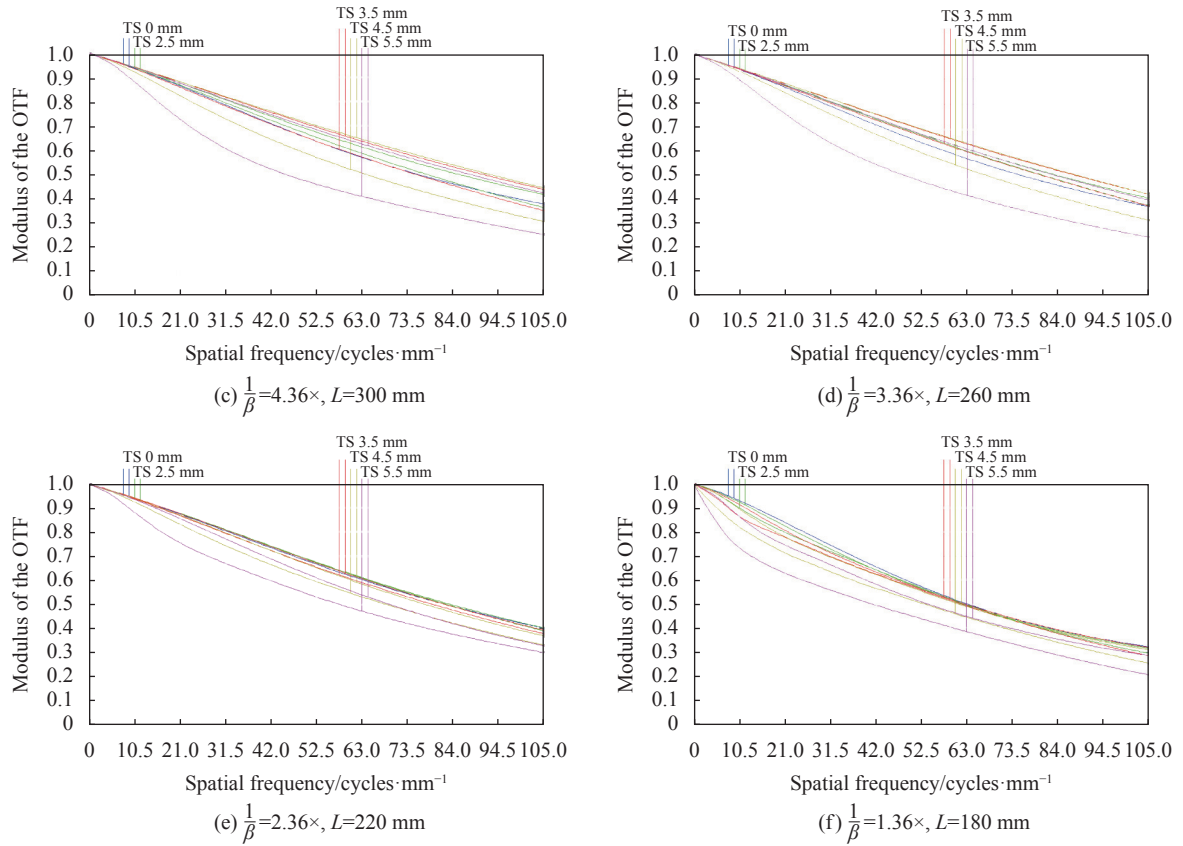
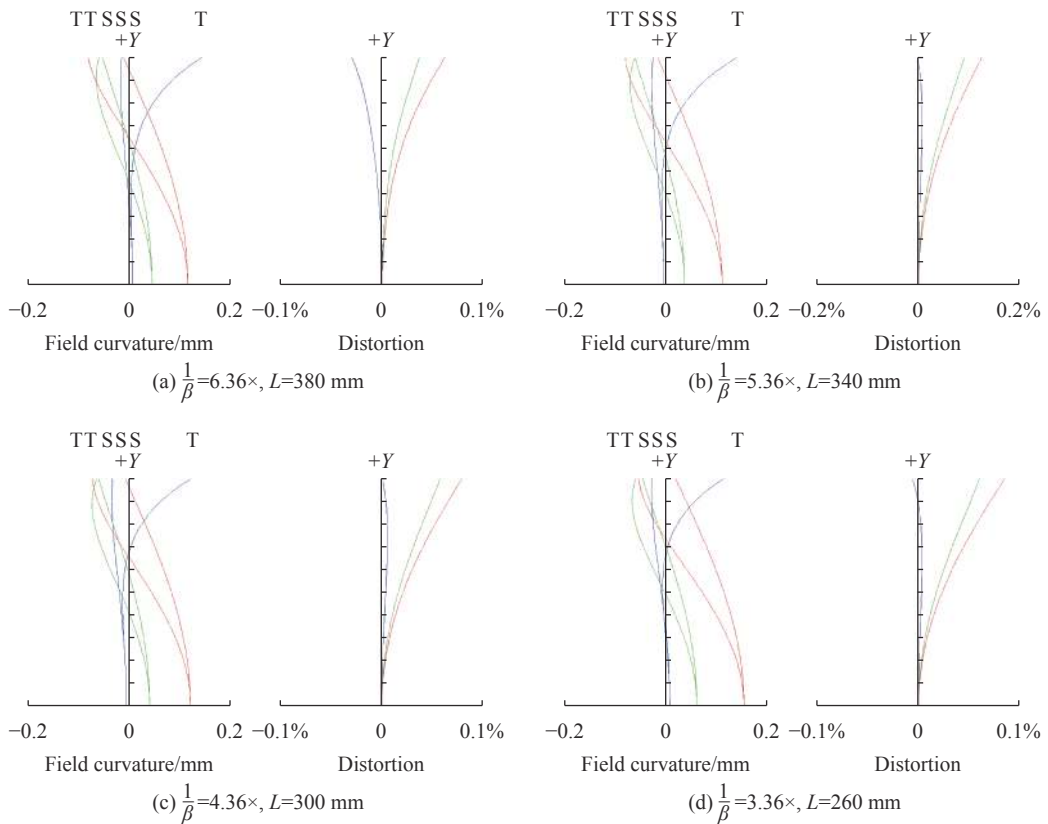


图 8 调制函数 (MTF) 曲线图

Fig.8 MTF curves



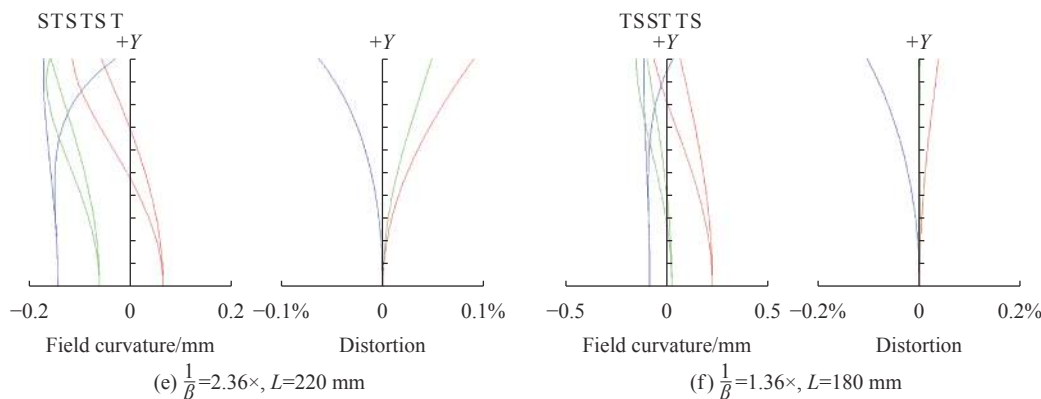


图 9 场曲和畸变图

Fig.9 Field curvature and distortion

2.5 公差分析以及凸轮廓线

在完成光学设计后, 还需考虑到后续对光学系统加工与装调的问题, 应根据实践经验给定合理的公差范围, 对光学系统中各镜片的表面公差要求如下: 光圈 $N=3$, 部分光圈 $\Delta N=0.3$, 镜片之间的空气厚度以及镜片厚度的公差为 $\pm 0.03 \text{ mm}$, x 、 y 轴偏心以及倾斜的公差分别为 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 和 $\pm 0.03^\circ$; 对光学系统中各镜

片的元件公差要求如下: x 、 y 轴偏心以及倾斜的公差分别为 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 和 $\pm 0.03^\circ$; 对光学系统的镜片材料公差要求如下: 折射率公差为 ± 0.001 , 阿贝数公差为 ± 0.002 , 公差分析评价模式选用衍射 MTF 平均。表 4 为经蒙特卡洛 200 次分析后得出的结果, 从表中可得, 文中设计的光学系统 MTF 在 105 lp/mm 处, 90% 以上的概率均优于 0.15, 达到实际加工以及装调要求。

表 4 各组态公差分析 MTF 值

Tab.4 Every configuration tolerance analysis MTF value

The demagnification $1/\beta=6.36\times$		The demagnification $1/\beta=5.36\times$		The demagnification $1/\beta=4.36\times$	
Probability	MTF	Probability	MTF	Probability	MTF
90%	0.311 483 06	90%	0.296 489 23	90%	0.282 185 24
80%	0.311 483 06	80%	0.317 166 91	80%	0.298 079 05
50%	0.350 469 05	50%	0.351 216 28	50%	0.328 115 32
20%	0.368 914 10	20%	0.371 196 18	20%	0.352 170 57
10%	0.376 041 26	10%	0.382 667 11	10%	0.363 481 25
The demagnification $1/\beta=3.36\times$		The demagnification $1/\beta=2.36\times$		The demagnification $1/\beta=1.36\times$	
Probability	MTF	Probability	MTF	Probability	MTF
90%	0.264 736 50	90%	0.200 961 35	90%	0.158 358 70
80%	0.290 885 54	80%	0.233 736 22	80%	0.177 205 59
50%	0.337 485 40	50%	0.300 522 46	50%	0.226 554 41
20%	0.364 577 86	20%	0.334 242 63	20%	0.256 265 45
10%	0.370 015 93	10%	0.348 610 35	10%	0.267 399 52

结合手术过程中的要求, 为更简便地达到改变工作距的同时变化倍率以及物面视场的效果, 文中设计的 3D 变焦外视镜光学系统采用设定六个档位进行调节来实现变焦, 由于前变焦组子系统有一个运动组元, 后变焦组子系统有两个运动组元, 而且只有前变

焦组和后变焦组的运动组元互相配合联动才能达到变焦的效果, 因此前变焦组子系统和后变焦组子系统应拟合出三条曲线, 三条变焦曲线均需选择六个点的坐标来进行绘图, 表 5 为系统运动组元位置与系统缩小倍率对应关系的数据。图 10 为系统运动组元拟合

表 5 系统运动组元位置与系统缩小倍率对应关系的数据表

Tab.5 Distance of the moving group from image versus the demagnification

The demagnification $1/\beta$	1.36×	2.36×	3.36×	4.36×	5.36×	6.36×
Distance of the second group from image/mm	251.16	247.32	242.76	237.45	229.69	219.11
Distance of the fifth group from image/mm	160.90	158.76	155.44	151.31	146.52	135.74
Distance of the sixth group from image/mm	104.35	104.62	105.21	107.96	113.99	120.79

出来的曲线, 凸轮曲线是否合理主要是看曲线中是否有明显拐点, 是否平滑^[17-18]。从图 10 中可以看出, 拟合的曲线是平滑的, 满足实际加工要求。

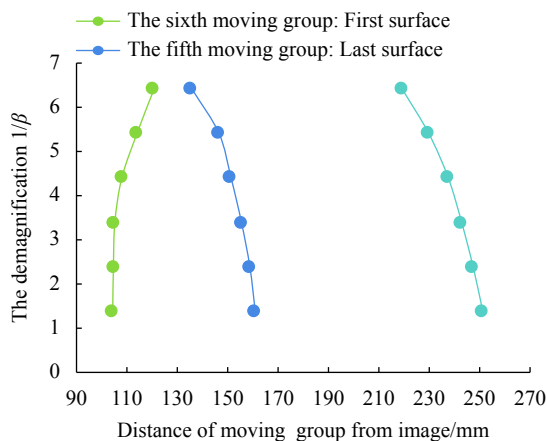


图 10 凸轮曲线

Fig.10 Cam curves

3 结 论

文中采用前变焦组子系统和后变焦组子系统组合的方式, 设计了一种长工作距的 3D 变倍外视镜光学系统, 实现了在显微外科手术中对病灶的精准监测。结果表明, 该系统可通过调整对应缩小倍率为 1.36~6.36 倍的变倍档位, 实现在 180~380 mm 范围内工作距离可变的效果; 系统通光半口径最大为 20 mm; 对应各个倍率组态的光学系统, 畸变优于 0.2%, 场曲优于 0.2 mm, 并在给定合理的公差范围内, MTF 在 105 lp/mm 处得出 90% 的样本均优于 0.15; 拟合出来的变倍凸轮曲线平滑流畅, 符合加工要求。相比于目前国内显微外科中的内窥镜以及手术显微镜等显微光学仪器, 该系统具有高分辨率、小型化、可变倍、长工作距等优点, 可广泛应用于显微外科手术中。为实现 3D 外视镜国产化提供了一种途径, 在后续工作中, 可在文中设计系统的基础上通过改变前、后组变焦系

统焦距以及替换大靶面图像传感器实现更大的物方视场。

参考文献:

- [1] Shirzadi A, Mukherjee D, Drazin D G, et al. Use of the video telescope operating monitor (VITOM) as an alternative to the operating microscope in spine surgery [J]. *Spine*, 2012, 37(24): E1517-E1523.
- [2] Nishiyama K. From exoscope into the next generation [J]. *Journal of Korean Neurosurgical Society*, 2017, 60(3): 289-293.
- [3] Oertel J M, Burkhardt B W. Vitom-3D for exoscopic neurosurgery initial experience in cranial and spinal procedures [J]. *World Neurosurgery*, 2017, 105: 153-162.
- [4] Wang Nan, He Yichun, Lan Beiwu, et al. Application of exoscope in neurosurgery [J]. *Chinese Journal of Minimally Invasive Neurosurgery*, 2019, 24(9): 426-428. (in Chinese)
- [5] Chen Xin, Yue Shuyuan. Application and prospect of exoscope in neurosurgery [J]. *Chinese Journal of Neurosurgery*, 2019(7): 735-737. (in Chinese)
- [6] Mamelak A N, Toshiko N, George B. Initial clinical experience with a high-definition exoscope system for microneurosurgery [J]. *Neurosurgery*, 2010(2): 476-483.
- [7] Mamelak A N, Danielpour M, Black K L, et al. A high-definition exoscope system for neurosurgery and other microsurgical disciplines: preliminary report [J]. *Surgical Innovation*, 2008, 15(1): 38-46.
- [8] Sack, Jayson, Steinberg, et al. Initial experience using a high-definition 3-dimensional exoscope system for microneurosurgery [J]. *Operative Neurosurgery*, 2018, 14(4): 395-401.
- [9] Feng Dawei, Jiang Huilin, Zhang Guangwei. 3D medical electronic endoscope system based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2012, 35(1): 38-42. (in Chinese)
- [10] Qu Rui, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, et al. Design of

- underwater large field of view zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200468. (in Chinese)
- [11] Yu Daoyin. Engineering Optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 23-26. (in Chinese)
- [12] Zhang Yimo. Applied Optics[M]. 4th ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2015: 556-558. (in Chinese)
- [13] Wang Zhijiang. Practical Optical Technology Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 429-430. (in Chinese)
- [14] Gao Jian, Xiang Yang, Yin Zhidong. Design of an optical system for a long working distance video microscope [J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(5): 416. (in Chinese)
- [15] Yang Lihua, Zhao Kan, Yu Shuangshuang, et al. Design of continuous zoom object lenses for tridimensional operating microscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118008. (in Chinese)
- [16] Cheng Lvji, Li Ping. Optically compensated MWIR zoom system [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(11): 645-648. (in Chinese)
- [17] Chen Hongda, Xue Changxi. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0222001. (in Chinese)
- [18] Gao Tianyuan, Hou Zhenyan. Comparison and research of zoom curve fitting methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 94-97. (in Chinese)