

文章编号: 1002-1582(2026)01-0001-06

用于机器视觉的高分辨率双视场双远心镜头设计

叶承轩, 陈子坤, 徐智谋, 王双保, 张学明*

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 双远心镜头所具有的低畸变、大景深等优点, 与机器视觉中高成像质量和多场景应用需求相匹配, 利用Zemax仿真设计了一款可用于机器视觉的高分辨率双视场双远心镜头。将该双远心系统分为固定结构和可拆卸结构的两部分, 通过翻转可拆卸结构, 即可在保证高分辨率和高远心度的同时改变系统的光学放大率, 提高了远心镜头在多个应用场景的适用性。所设计的具有双视场双远心镜头在可见光波段(486~656nm)内, 平均弥散斑半径小于 $9\mu\text{m}$, 各视场远心度均小于 0.015° , 畸变率低于 0.1% , 调制传递函数在75lp/mm时大于0.4, 各视场波像差均小于 $\lambda/4$ 。性能能够满足实际应用要求。

关 键 词: 应用光学; 双视场; 高分辨率; 双远心镜头; 远心度; 畸变

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Design of High-resolution double telecentric lens with Dual-field for machine vision

YE Chengxuan, CHEN Zikun, XU Zhimou, WANG Shuangbao, ZHANG Xueming*

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The dual-telecentric lens features advantages such as low distortion and large depth of field, which match the requirements for high imaging quality and multi-scenario applications in machine vision. A high-resolution dual-field double telecentric lens suitable for machine vision was designed and simulated using Zemax. The double telecentric system was divided into two parts: a fixed structure and a detachable structure. By flipping the detachable structure, the optical magnification of the system could be changed while maintaining high resolution and high telecentricity, improving the applicability of the telecentric lens in multiple application scenarios. For the designed dual-field double telecentric lens within the visible light wavelength range (486~656nm), the average spot radius is less than $9\mu\text{m}$, the telecentricity in both fields of view is less than 0.015° , the distortion rate is lower than 0.1% , the modulation transfer function is greater than 0.4 at 75lp/mm, and the wave aberration in both fields of view is less than $\lambda/4$. The performance meets the requirements of practical applications.

Keywords: applied optics; dual-field; high-resolution; double telecentric lens; telecentricity; distortion

0 引 言

在工业自动化检测与精密计量高速发展的背景下, 对于生产、制造所要求的精度也在不断提高, 人眼检测难以达到在实际测量中所需的精度,

而相较于人眼检测, 机器视觉具有更高的分辨率、更快的响应速度与更好的稳定性等突出优点^[1]。通过光学技术和机器视觉系统的结合, 可以在非接触的情况下进行高精度的测量^[2]。在机器视觉系统中, 使用的光学镜头直接影响着软件对于采集图

收稿日期: 2025-06-30; 收到修改稿日期: 2025-10-15

基金项目: 应用光学教学团队湖北省级应用光学一流课程建设项目(2022-65)、湖北省国际科技合作重点项目计划(现代应用光学科研团队, 2023EHA028)

作者简介: 叶承轩(2004—), 男, 本科生, 从事光学系统设计研究。u202210596@hust.edu.cn

张学明(1968—), 男, 讲师, 从事光学系统设计研究。

* 通讯作者: optzhang@163.com

像的处理速度与精度,因此,镜头的成像效果与该系统的性能好坏密切相关。传统光学系统因存在视差效应与非线性畸变,当物距或像距发生微小变化时,易导致成像比例失真,难以满足精密测量中“物像尺寸线性对应”的核心要求。双远心镜头综合了物方、像方远心镜头的优点,即允许物距和工作距离发生细微变化^[3],同时又能保证图像放大倍率几乎不发生改变。远心镜头所具有的低畸变、恒定成像倍率、大景深、照度均匀等优点是普通镜头不具备的,因此其在工业界被广泛应用于机器视觉等系统。

近年来,针对双远心镜头的研究工作日益增多。桂林电子科技大学的李明东等^[4]设计了一款高分辨率的双远心物镜,其采用色散差较大的双胶合透镜以减小高级球差;为了更好校正主光轴外像差,将靠近光阑的镜片向光阑方向弯曲,以减小主光线在光路中的偏角。福建师范大学的叶文炜等^[5]设计的双远心系统,其将系统中常见的一个目镜增加至两个,使系统同时具有两种放大倍率,实现了双视野。桂林量具刃具有限责任公司的刘凌鸿等^[6]设计了一款具有三个倍率的双远心镜头,通过在系统上配备3块目镜,同时拥有3个放大倍率,实现既能在大视场范围内进行轮廓检测,也能在小视场范围内对局部特征进行细节观测。

目前市面上大部分机器视觉系统上只能配备一块镜头,实现一个放大倍率,而当需要使用不同的放大倍率进行测量时,必须将现有镜头拆卸下来后更换为另一块,操作较为繁琐;而另一些多视野的双远心镜头设计了多个光路,但导致系统体积增大。针对现有结构的不足,本文提供一种具有双视场的高分辨率双远心镜头,将该系统分为固定结构和可拆卸结构两部分,仅通过翻转系统中可拆卸部分的镜头组,即可改变放大倍率,提高了双远心系统的适用度和便捷度。

1 双远心镜头的基本原理

有物方远心、像方远心和双远心共3种远心光路^[7],图1为各自的光路图。物方远心光路中,孔径光阑设置在光学系统的像方焦面上,通过阻挡部分远轴光线,仅让近轴光线入射至像平面,能大幅减小调焦误差引入的测量误差,而且当物距出现微小改变时,物体的放大倍率不会随之变动;像方远心光路则是将孔径光阑设置在光学系统的物方焦面上,同样是通过限制光线,使得像平面位置的变化不会对系统成像大小产生影响;双远心光路通过精确的光路设计,让物方、像方镜组

的焦点处于同一位置,并把孔径光阑放置在共焦点处,此时系统的出瞳和入瞳均在无穷远。双远心光路消除了调焦不准引入的视差误差,同时确保全视场范围内成像放大率恒定。这种特性使其在大景深环境下仍能保持测量精度的稳定性,成为打破传统光学系统局限性的关键方案。在工业机器视觉应用中,远心光学系统可以很大程度上降低传统系统在测量过程中带来的视差和畸变。不过,设计兼具高分辨率、低畸变与严格远心度的光学系统面临多重挑战,包括复杂像差的平衡、光学材料的色散匹配以及机械结构的紧凑性优化等。

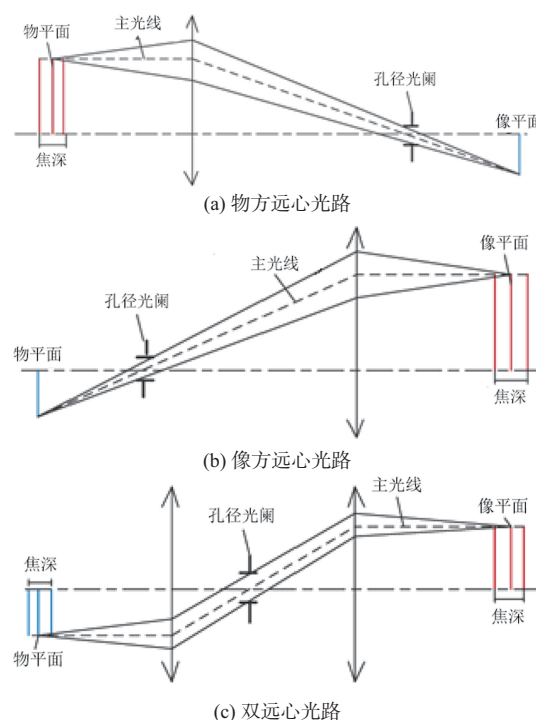


图 1 远心光路示意图

2 双远心光学系统的设计

2.1 设计指标

在工业机器视觉系统中,双远心镜头主要的系统指标为远心度、分辨率和放大倍率等。本文设计的高分辨率双视场双远心镜头选择1800万像素的全画幅CCD作为图像接收器,其单个像元尺寸为 $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ 。系统的两个放大倍率指标设置为 $-1\times$ 和 $-0.5\times$,其像方视场相同,而物方视场不同,对不同大小的物体可以选用不同的放大倍率进行成像,扩大了其应用范围。放大倍率的计算公式

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (1)$$

由奈奎斯特采样定理可知,要能够分辨物面上的一个点,必要条件是其经光学系统成像后可以覆盖两个以上CCD像元,测量精度的计算公式

$$\sigma=\frac{2a}{\beta}$$

(2)

可以看出当相机的像元尺寸保持不变，系统的放大倍率越大，则能够分辨的物面两点间距越小，测量精度也就越高。计算出 $-1\times$ 和 $-0.5\times$ 的放大倍率下，系统的测量精度分别为 $14\mu\text{m}$ 和 $28\mu\text{m}$ 。

机器视觉系统被广泛地应用于工业自动化检测、精密计量、航空航天等领域，因此，对于其成像的光学性能（放大倍率、数值孔径、远心度等）、工作距离以及环境温度等外部因素会有一定的要求。本文设计的双远心光学系统的技术指标如表 1。

表 1 双远心光学系统设计指标

参数名称	指标要求
工作距离/mm	>100
系统放大倍率	$-1/-0.5$
物方全视场/mm	43.33/86.6
像方全视场/mm	43.33
后截距/mm	>50
分辨率/mm	<0.01
远心度/(°)	<0.05
系统畸变	$<0.2\%$
系统筒长/mm	<200
调制传递函数(100lp/mm)	>0.3
物方数值孔径	0.06
波段/nm	(可见光)486~656

2.2 初始结构的选择

本方案中选择初始结构主要从以下两个角度考虑：其一是选用性能参数与本文中的系统预期参数指标相匹配的系统作为初始结构；其二是在固定结构不变的前提下，所设计的放大倍率各自都能较好地成像。为实现这两个目标，在本方案中，将远心镜头分为固定结构和可拆卸结构两部分，固定结构可以同时匹配可拆卸结构的正反两面，使系统达到同时拥有不同放大倍率的目的。

目前常见的双远心结构的构建方法有：第一种对双高斯镜头进行修改；第二种结合现有文献或专利库中所提出的结构和对应的参数要求，确定系统的初始结构；第三种分别设计物方远心和像方远心结构，最后进行对接，利用平行平板构建一个远心结构后，进行对称处理，即得到放大倍率为 $1\times$ 的双远心初始结构。本方案中选用最后一种方法来构建双远心镜头初始结构。图 2 为系统初始结构示意图。红色框出部分为可拆卸部分，其余均为固定部分的初始结构。

该初始结构采用了对称设计，即像方镜头和物方镜头都能够单独作为远心镜头使用。该结构的优点体现在对称光路可以一定程度上减少误差，

同时对于远心度的控制也较为容易。该结构含有的镜片数较少，为后续添加镜片提供了操作空间。其镜片所使用的材料皆为 CDGM 库中的常见玻璃。初始结构具体的参数设置如图 3 所示。

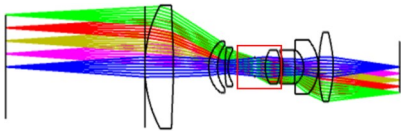


图 2 系统初始结构示意图

表面	类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	半口径
0	标准面		无限	137.9567 V			43.3000
1	标准面		无限	0.0000			50.5420
2	偶次非球面		-366.1512 V	28.2557 V	H-ZLAF...	S	51.3463
3	偶次非球面		-364.4494 V	35.0005 V			48.4268
4	标准面		25.1403 V	8.5027 V	D-ZK79	S	21.2619
5	标准面		25.7051 V	7.6466 V			17.8487
6	标准面		91.9491 V	2.9999 V	ZF7	S	16.3361
7	标准面		22.5789 V	26.7593 V			13.5001
8	标准面		无限	9.9960 V			7.3790
9	标准面		23.7704 V	15.0026 V	D-FK61	S	13.8914
10	标准面		-31.7978 V	2.5887 V			13.8223
11	标准面		-30.4146 V	11.9166 V	ZF7L	S	13.0160
12	标准面		-189.9366 V	8.6228 V			14.0632
13	标准面		-16.1015 V	14.5281 V	H-ZLAF...	S	14.1197
14	标准面		-30.3877 V	0.4978 V			22.6641
15	偶次非球面		54.1713 V	14.3219 V	H-ZLAF...	S	28.3894
16	偶次非球面		52.6516 V	65.9631 V			28.6789
17	标准面		无限	-			21.4238

图 3 系统初始参数设置

2.3 设计过程与结果

将确定好的系统初始结构输入到 Zemax 软件中进行优化。

该双远心镜头需要实现部分镜组可翻转的目标，为了使系统关于光阑大致对称分布，选择翻转初始结构的第 4 片镜片，同时为了使镜头的可翻转部分与不可翻转部分在设计过程中有较大的自由度，将原本仅含一片镜片的翻转部分替换为含有 3 个镜片的可翻转镜组，利用 Zemax 中的多重结构参数以及拾取功能设置翻转前后的结构。同时，初始结构中的 7 片镜片，在结构修改后到达了 9 片，每个部分有 3 片镜片。本文在兼顾系统成本和设计难度的前提下，保持系统每一部分的镜片数为 3 片，整个系统共 9 片透镜，且为了提高光通量，设置系统 F 数为 8。为了在 Zemax 方便实现翻转结构的构建，还设置了与反转结构同等镜片数目的厚度为 0 的空气镜片，来为翻转后的镜组占位，如图 3 所示。

再次，在对于像差的校正上，双远心系统不仅需要将球差、彗差等基本像差校正至较好的指标，还需要着重优化畸变率和远心度，确保其低于某一标准值。为了降低像差，将最外侧的两个镜面设置为偶次非球面；为了优化远心度，可以通过 RAID 操作数来控制光线在物面和像面上与光轴的夹角，在理想的双远心镜头中，光线应垂直于物面和像面。在 Zemax 中设定 6 个视场高度，分别为 $0H$ 、 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 、 $1H$ ，将操作数 RAID 的目标值设置为 0，即远心度为 0，并在物面和像面的 6 个视场进行优化。将远心度优

化至预期指标后发现畸变已经较小,此时使用操作数DIMX对其进一步约束,使其达到预期指标。

优化完成后的系统三维布局图如图4所示。观察比较两图可以看出,两个系统的区别仅有中间两个镜组摆放方向相反,其他镜片均无差别。

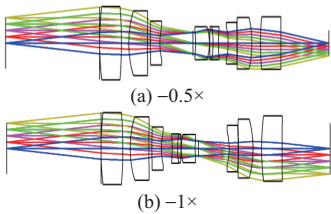


图4 系统结构示意图

系统参数设置如图5所示,对比参数可以看出,两个系统的区别仅为面8~13与面13~19互换了位置,其他面的设置均完全相同。

面	面型	材料	厚度/mm	曲率半径/mm	偏心/mm	倾斜/deg	面	面型	材料	厚度/mm	曲率半径/mm	偏心/mm	倾斜/deg
1	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	1	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
2	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	2	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
3	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	3	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
4	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	4	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
5	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	5	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
6	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	6	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
7	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	7	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
8	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	8	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
9	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	9	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
10	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	10	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
11	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	11	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
12	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	12	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
13	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	13	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
14	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	14	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
15	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	15	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
16	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	16	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
17	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	17	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
18	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	18	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
19	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	19	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
20	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	20	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
21	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	21	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
22	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	22	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
23	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	23	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
24	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	24	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
25	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	25	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
26	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	26	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00
27	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00	27	球面	玻璃	10.00	21.45	0.00	0.00

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

曲率半径/mm

偏心/mm

倾斜/deg

面型

材料

厚度/mm

<

图5 系统参数设置

2.4 MTF 曲线分析

调制传递函数(MTF)曲线反映了光学系统在不同频率下传递物方信息的能力,调制传递函数的计算公式

MTF(f)=Cout/Cin (3)

输出的图像由于在系统中传输产生的偏差不可避免,其对比度总是小于输入图像,即Cout<Cin,所以MTF值总是介于0~1之间。光学系统的分辨率截止频率

NL=1000/2a (4)

当光学系统的奈奎斯特频率处的MTF值大于0.2,一般可以认为系统成像性能良好。与本系统相匹配的全画幅CCD的单个像元尺寸为7μm×7μm,其NL=71.4lp/mm。从图6可以看出在75lp/mm处,放大倍率为-1和-0.5的系统中心视场到边缘视场的范围内MTF值均大于0.4,且MTF曲线基本重合,表示在整个视场范围内,系统对于各个视场高度的成像质量相近。同时,将2个放大倍率对应的MTF曲线图进行对比,可以看出高倍率的光学系统在靠近中心视场的MTF值更高,成像质量更好。

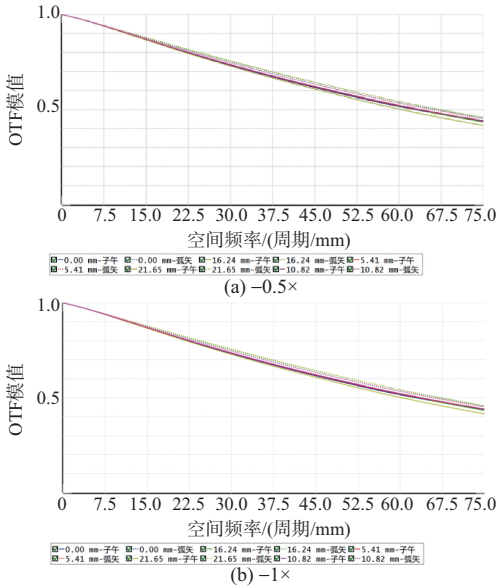


图6 MTF 曲线图

2.5 点列图分析

与本系统匹配的全画幅CCD单个正方形像元边长为7μm,物方一点的成像为像方一个弥散光斑,若其均方根半径未超过像元尺寸,则该光学系统不会发散物方的能量,成像性能良好。表2列出了在两个放大倍率下不同视场的弥散斑半径。

表2 双远心系统各视场弥散斑半径

放大倍率	弥散斑半径/μm				
	0H	0.25H	0.5H	0.75H	1H
-0.5×	7.233	8.451	8.222	7.291	7.254
-1×	8.221	8.149	8.205	8.153	8.171

点列图如图7所示,可以看出-0.5×的系统在设定视场范围内的弥散斑平均半径为8.627μm,-1×的系统的弥散斑平均半径为8.179μm。对比2个放大倍率下的点列图,高倍率的光学系统具有更小的弥散斑,且分布更规则。

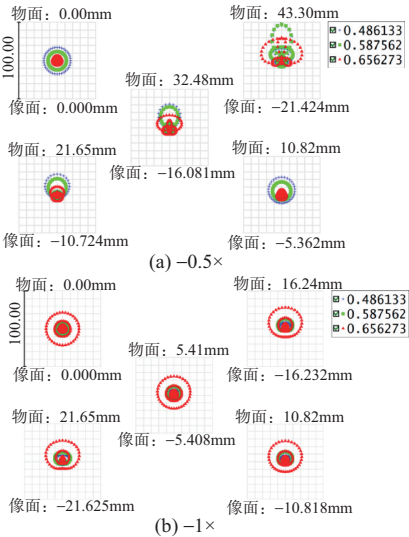


图7 点列图

2.6 畸变图分析

镜头畸变虽然不会影响系统成像的清晰度，但会使物体成像产生一定程度的形变。而由于远心系统常被用于精密测量领域，因此在设计系统时必须将畸变优化至一定范围内。通常情况下远心镜头的畸变率都控制在 0.1% 以下。表 3 列出了在两个放大倍率下不同视场的系统畸变率。

放大倍率	系统畸变率/%				
	0H	0.25H	0.5H	0.75H	1H
-0.5×	0	0.0048	0.0098	-0.0372	-0.1100
-1×	0	0.0053	0.0223	0.0535	0.0999

畸变图如图 8 和图 9 所示，可以看出离光轴越远的光线其畸变率越大，其中：-0.5×的系统畸变最大值为 0.110%，网格畸变的最大值为 0.0982%；-1×的系统畸变最大值为 0.099%，网格畸变的最大值为 0.0999%，均在标准值的 0.1% 附近，符合设计要求。

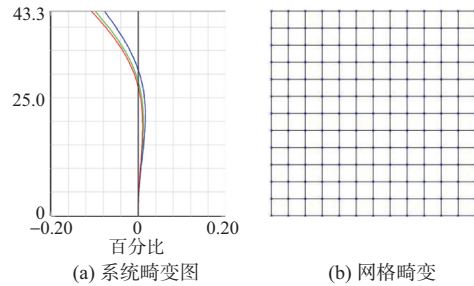


图 8 -0.5×系统的畸变图

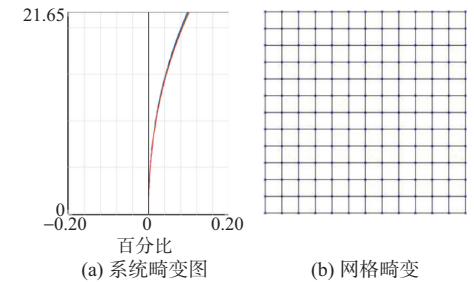


图 9 -1×系统的畸变图

2.7 远心度分析

远心系统的主要评价指标之一是远心度。对于大部分远心系统，小于 0.1° 的远心度说明具有较好的远心性能。双远心系统需对物方和像方的远心度进行约束，当视场高度设置为 0H、0.25H、0.5H、0.75H、1H 时，物方和像方的远心度如表 4 和表 5 所列，可以看出 -0.5× 和 -1× 的远心度最大值分别为 0.0136° 和 0.0131°，小于 0.02° 的目标值，也远小于通常指标所规定的 0.1°，说明远心度设计符合要求。

表 4 双远心系统各视场物方远心度

放大倍率	物方远心度/(°)				
	0H	0.25H	0.5H	0.75H	1H
-0.5×	0	0.0055	0.0101	0.0128	0.0131
-1×	0	0.0022	0.0046	0.0076	0.0121

表 5 双远心系统各视场像方远心度

放大倍率	像方远心度/(°)				
	0H	0.25H	0.5H	0.75H	1H
-0.5×	0	0.0026	0.0051	0.0075	0.0096
-1×	0	0.0089	0.0136	0.0107	0.0019

2.8 波前图分析

波前图是评估系统像差与成像质量的关键工具，其中 PV（Peak-to-Valley）值表征波前最高值与最低值的最大偏差，RMS（Root Mean Square）值则通过统计平均反映出整体像差水平。理论上，当波前 RMS 误差小于 $\lambda/4$ 时，系统性能接近瑞利判据所规定的衍射极限，可实现优异的成像效果；若 RMS 误差超过 $\lambda/2$ ，调制传递函数（MTF）将显著下降，导致图像清晰度降低。

本设计中，双视场双远心镜头在可见光波段（486nm-656nm）内的各视场波前像差均表现良好，-1× 的波前图如图 10 所示，其中图 10（a）为轴上视场的波前图，此时 $PV=0.0806\lambda < \lambda/4$ ， $RMS=0.0179\lambda \ll 0.5\lambda$ ；图 10(b)为最大 Y 视场的波前图，此时 $PV=0.1815\lambda < \lambda/4$ ， $RMS=0.0450\lambda \ll 0.5\lambda$ ，出瞳直径为 849.84mm，说明该系统成像质量较高，产生的波前畸变可近似忽略不计。

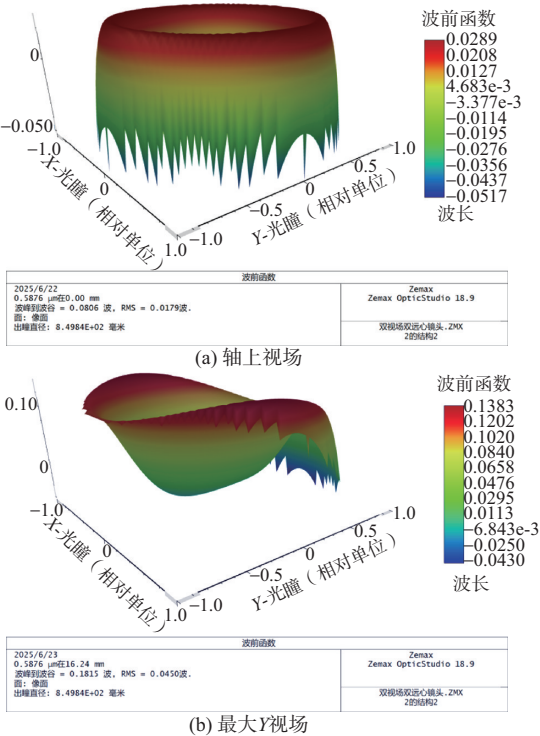


图 10 放大倍率为-1的系统波前图

3 公差分析

由于没有一个光学零件是完美加工的，也没有一个系统能完美装配，且某一参数的微小误差可能对整个光学系统性能造成较大影响。因此，在完成整个光学系统的设计后，还需要对该系统进行公差分析，在保证系统性能可接受的前提下，给零件加工和装配分配公差。选用蒙特卡罗分析法对系统进行公差分析，评价所用的公差类型及其含义如表 6 所示。

表 6 公差类型及其含义

类型	含义
TEDX	组件在 x 方向上的偏移公差
TEDY	组件在 y 方向上的偏移公差
TSDX	镜片表面在 x 方向上的偏心公差
TSDY	镜片表面在 y 方向上的偏心公差
TRAD	镜片在 x 方向上的垂轴像差
TIRX	镜片在 x 方向上的表面倾斜公差

$-0.5\times$ 系统和 $-1\times$ 系统的各公差最敏感面及其改变值分别如表 7 和表 8 所示，可以看出， $-0.5\times$ 的公差最敏感面为第 15、16 面， $-1\times$ 系统的公差最敏感面为第 12、13 面，观察系统结构图发现，它们对应的是同一块镜片，即都是可翻转结构中靠近系统中心的镜片。将改变值与标准值对比，可以看出对于各公差类型，改变值均低于标准值，因此该光学系统具有良好的加工性。

表 7 放大倍率为 $-0.5\times$ 时弥散斑 RMS 的最坏偏离

类型	表面	表面	数值	标准	改变
TEDX	15	15	-0.2	0.04807602	0.04204318
TEDY	15	15	-0.2	0.04807602	0.04204318
TSDX	16	16	-0.2	0.04654508	0.04051224
TSDY	16	16	-0.2	0.04654508	0.04051224
TRAD	16	16	-0.2	0.04463187	0.03859903

表 8 放大倍率为 $-1\times$ 时弥散斑 RMS 的最坏偏离

类型	表面	表面	数值	标准	改变
TEDX	13	13	-0.2	0.02997516	0.02399559
TEDY	13	13	-0.2	0.02997516	0.02399559
TIRX	12	12	-0.2	0.02452257	0.01854300
TSDX	12	12	-0.2	0.02888497	0.02290539
TSDY	12	12	-0.2	0.02888497	0.02290539

4 结 论

本文介绍了一个具有双视场的高分辨率双远心镜头，有 $-1\times$ 和 $-0.5\times$ 的放大倍率可供更换，通过翻转可拆卸部分的镜头组即可实现倍率改变。介绍了系统初始结构的设置依据以及其优化的过程。对 MTF、像差、畸变、远心度、波像差及公差进行分析，结果表明该双远心镜头系统成像性

能较好，受公差影响较小。

经过 Zemax 多次优化后，系统具有优良的成像性能。成像质量方面，MTF 曲线表明该系统在不同空间频率下对比度较好，对边缘视场仍能保证较高的成像质量，对高频细节保持较高的分辨率；系统畸变与网格畸变均保持在 0.1% 以内，符合远心镜头的基本要求。在远心度上，各视场的像方远心度和物方远心度均远超一般指标，表明系统远心性能好。公差分析显示，在给定的公差条件下，系统弥散斑 RMS 半径变化量均低于标准值，保证了系统在实际加工和装配中的性能的稳定性与可靠性。分析比较光学系统两个放大倍率下的成像效果，高倍率、小视场的系统各性能指标均表现地更好。

本高分辨率双视场双远心光路主要解决了当前市面上大部分远心系统应用场景局限的问题。后续研究可针对不同的应用场景，对系统的放大倍率、视场及各性能参数进行优化以提升系统在多场景下的性能表现。

参考文献：

[1] 杨康. 基于机器视觉的工业镜头的设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2013:1—3.
Yang Kang. Design of several industrial camera based on machine vision[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013:1—3.

[2] 陈智利, 刘雨昭, 费芒芒, 等. 大视场双远心工业镜头光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(5):444—450.
Chen Zhili, Liu Yuzhao, Fei Mangmang, et al. Design of industrial double telecentric optical lens with large field of view[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(5):444—450.

[3] 夏兵, 王敏, 郭巧双, 等. 用于小零件图像测量的双远心光学系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(4):314—318.
Xia Bing, Wang Min, Guo Qiaoshuang, et al. Bilateral telecentric system for image measurement of small parts[J]. Optical Instruments, 2015, 37(4):314—318.

[4] 李明东, 高兴宇, 陈朋波, 等. 基于机器视觉的高分辨率双远心物镜设计[J]. 光学仪器, 2016, 38(3):226.
Li Mingdong, Gao Xingyu, Chen Pengbo, et al. The design of high resolution double telecentric lens based on machine vision[J]. Optical Instruments, 2016, 38(3):226.

[5] 叶文伟, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1):012202.
Ye Wenwei, Zhou Tianfu, Huang Jingxuan, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1):012202.

[6] 刘凌鸿, 冯云, 农柳华, 等. 三倍率双远心镜头设计及视场对光学设计影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7):290-298.
Feng Yun, Nong Liuhua, et al. Three-magnification double-telecentric optical system and effect of field on optical design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7):290—298. DOI:10.

[7] 曹一青. 一种用于机器视觉系统的双远心镜头设计[J]. 红外技术, 2022, 44(2):140.
Cao Yiqing. Design of double telecentric lens using machine vision system[J]. Infrared Technology, 2022, 44(2):140.