

无人机载小型大视场高分辨率曲面复眼镜头设计

张殊悦^{1,2}, 朱冬晨², 李嘉茂^{2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²中国科学院上海微系统与信息技术研究所仿生视觉系统实验室, 上海

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月7日; 发布日期: 2025年5月14日

摘要

文章设计了一款适用于无人机载高性能成像的曲面复眼相机系统, 兼具大视场、高分辨率和小型化特点。系统由曲面子眼阵列、中继转像系统和平面接收器组成, 子眼焦距为12 mm, 半视场角为6°, 中继转像系统焦距为8 mm, 搭载像元尺寸为3.75 μm 的传感器。中继转像系统的引入使得各子眼参数完全一致, 并将曲面子眼阵列的曲面像转化为便于平面接收器接收的平面像。系统总视场达到112°, 体积仅为60 mm $\times$ 60 mm $\times$ 72 mm, F数为3.5, 焦距为3.75 mm。在对地距离500 m的高空拍摄时, 地面分辨率达到0.5 m。仿真结果表明, 系统各视场子眼在奈奎斯特截止频率处的MTF值均大于0.3, 并满足光学成像系统公差表“Q5”等级要求。最后经过仿真分析验证, 系统在-20°C至50°C温度区间内可以正常工作。与现有无人机载相机系统相比, 该设计在实现更大视场和更高地面分辨率的同时大幅减小了系统体积, 为无人机载相机的高性能成像提供了创新解决方案。

关键词

仿生复眼, 曲面阵列, 成像系统, 公差分析

UAV-Mounted Small, Large-Field, High-Resolution Curved Compound Lens Design

Shuyue Zhang^{1,2}, Dongchen Zhu², Jiamao Li^{2*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Release Vision Systems Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Chinese Academy of Sciences, Shanghai

Received: Apr. 14th, 2025; accepted: May 7th, 2025; published: May 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张殊悦, 朱冬晨, 李嘉茂. 无人机载小型大视场高分辨率曲面复眼镜头设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 325-335. DOI: 10.12677/mos.2025.145397

Abstract

In this paper, a curved compound eye camera system suitable for UAV-borne high-performance imaging is designed, and it has the characteristics of a large field of view, high resolution, and miniaturization. The system consists of a curved sub-eye array, a relay image system, and a planar receiver, with a sub-eye focal length of 12 mm and a field of view of 6 degrees, and a relay image rotation system with a focal length of 8 mm, and a sensor with a pixel size of $3.75\ \mu\text{m}$. The introduction of the relay image rotation system makes the parameters of each sub-eye completely consistent and transforms the surface image of the curved sub-eye array into a planar image that is convenient for the plane receiver to receive. The total field of view of the system reaches 112° , the volume is only $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 72\text{ mm}$, the F-number is 3.5, and the focal length is 3.75 mm. In aerial shooting at a distance of 500 meters, the ground resolution reaches 0.5 meters. The simulation results show that the MTF values of each field of view eye of the system at the Nyquist cut-off frequency are all greater than 0.3 and meet the requirements of the "Q5" level of the tolerance table of the optical imaging system. Finally, the simulation analysis verified that the system can work normally in the temperature range of -20°C to 50°C . Compared with the existing UAV-borne camera system, this design achieves a larger field of view and higher ground resolution while significantly reducing the system size, providing an innovative solution for high-performance imaging of UAV-borne cameras.

Keywords

Bionic Compound Eyes, Surface Array, Imaging System, Tolerance Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无人机凭借其灵活机动、小型化和智能化的特点,已广泛应用于农业管理[1]、环境监测[2]、军事侦察[3][4]等领域。然而,传统无人机载相机存在视场小[5]-[7]、体积大等问题,获取的仅是三维场景的二维投影信息,这限制了其在测速与定位、深度估计等任务中的应用[8]。为突破这些局限,部分研究者提出了多相机系统[9]。然而,该系统不仅体积庞大、数据处理复杂,而且在实际应用中多相机的同步问题仍面临较大挑战。

曲面复眼与平面复眼系统相比,曲面复眼系统通过子眼阵列构建非平面的成像结构,能够有效减少像差并扩大视场范围。虽然鱼眼镜头[10]也能实现大视场成像,但同时伴随着严重的畸变和轴外像差问题。基于这些问题,诸多科研人员开始广泛地对曲面复眼系统进行研究。

习啸天[11]等人设计了一款复眼相机系统,其最大视场为 122° ,在对地距离 1000 m 的高空拍摄时,地面分辨率可达 0.8 m,系统总体积为 $123\text{ mm} \times 123\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ 。许黄蓉[12]等人设计了一个采用六边形环带排布的曲面大孔径复眼系统,总视场达到 $98^\circ \times 98^\circ$,在对地距离 500 m 的高空拍摄时,地面分辨率达到 1 m,系统体积为 $123\text{ mm} \times 123\text{ mm} \times 195\text{ mm}$ 。尽管上述系统实现了大视场,但在地面分辨率和体积控制方面仍存在一定不足。

针对这一问题,本文聚焦于无人机载相机对大视场、高分辨率及小型化的需求,研究在小型化设计的前提下如何兼顾大视场与高分辨率的性能优化。

2. 系统设计

2.1. 子眼阵列的设计

曲面复眼相较于平面复眼更贴近自然界复眼的结构特性,其高灵敏度的优势源于子眼间的视场重叠。相较于平面排列,曲面排列的子眼系统能够实现更大的视场,因此,子眼的排列方式成为研究的关键。本文采用六边形排布方式,以进一步提高光能利用率[13],为大视场、高分辨率成像提供优化设计方案。

图1中 R 是子眼曲面排列基底曲率半径, d 是相邻子眼之间的间距, D 是子眼孔径, φ 是相邻子眼之间的夹角, 2ω 是子眼的视场。

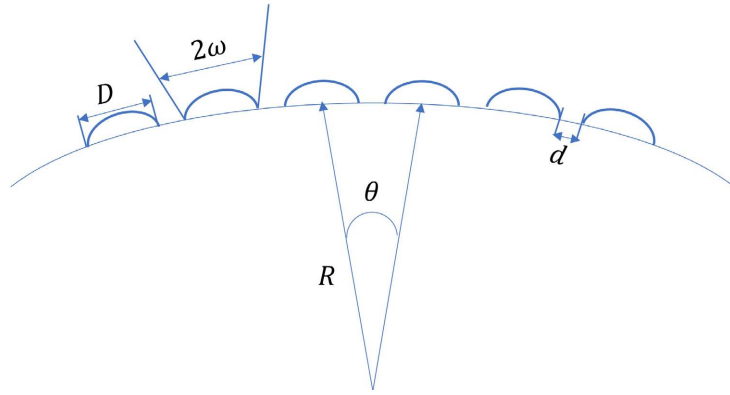


Figure 1. Schematic diagram of the surface arrangement of the sub-eye
图 1. 子眼曲面排列示意图

相邻子眼间的光轴夹角为:

$$\varphi = \arctan \frac{D+d}{R} \quad (1)$$

相邻子眼间的视场重叠率为:

$$\sigma = \frac{2\omega - \varphi}{2\omega + \varphi} \quad (2)$$

式中 σ 为视场重叠率。当 $\sigma > 0$ 时, $2\omega > \varphi$; 当 $0 < \varphi < \omega$ 时, 在无穷远处, 三个相邻子眼中间子眼的视场会被相邻两个子眼完全覆盖[14], 所以取 $2\omega > \varphi > \omega$ 。

复眼光学系统总视场从下式可得:

$$2\theta = 2\varphi(S-1) + 2\omega \quad (3)$$

其中, 2θ 为复眼光学系统总视场, S 为六边形环带层数。

子眼个数 n 与六边形环带层数关系为[13]:

$$n = 3S^2 - 3S + 1 \quad (4)$$

对于二次成像系统, 系统焦距与子系统焦距的关系为:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (5)$$

系统采用 1/3" ICX445 作为接收器, 其感光表面对角线为 6 mm, 像素尺寸大小为 3.75 μm 。地面分辨率公式为:

$$f = \frac{ph}{u} \tag{6}$$

其中 f 为系统焦距， p 为像元尺寸， h 为对地高度， u 为地面分辨率。考虑到小型化的需求，令子眼焦距为12 mm，中继系统焦距为8 mm，作为初始结构。

根据设计指标要求，参数结合公式(5)和公式(6)，系统总体参数如表 1 所示。

Table 1. Design indicators for compound ophthalmic systems

表 1. 复眼光学系统设计指标

系统参数	设计指标
总视场 θ	112°
波长范围	可见光
F 数	3.5
子眼视场 ω	6°
子眼孔径 D	2 mm
光轴夹角 φ	10°
六边形环带层数 S	6
子眼个数 n	91
子眼焦距 f_1	12 mm
材料库	成都光明

根据奈奎斯特计算公式可得复眼系统的截止频率为：

$$f_{Nyquist} = \frac{1000}{2p} = \frac{1000}{7.5} = 133\text{l p/mm} \tag{7}$$

子眼由三块镜片构成，图 2 和图 3 分别展示了优化后子眼的结构；点列图及调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)图。

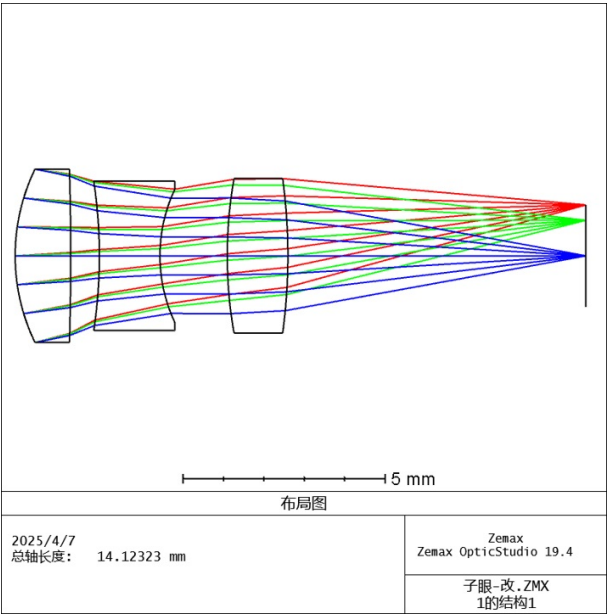


Figure 2. Sub-eye structure diagram

图 2. 子眼结构图

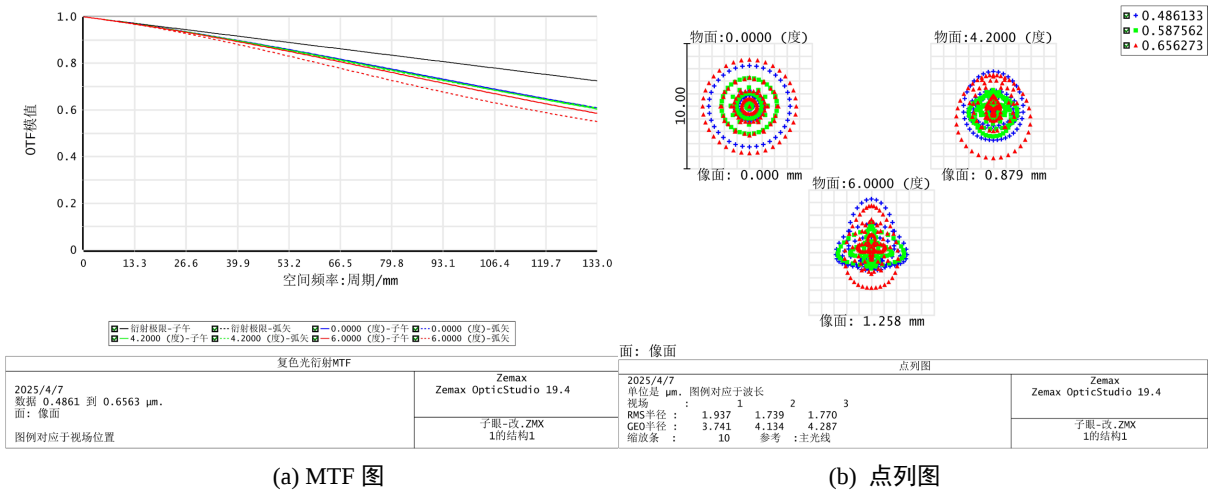


Figure 3. Simulation analysis diagram of the optical system for sub-eye imaging
图 3. 子眼成像光学系统仿真分析图

经过仿真分析,从图 3(a)可看出 MTF 截止频率处的值均大于 0.3,且子眼各视场的 RMS 半径均小于单个像元尺寸,能够满足光学成像系统与接收器的匹配要求。

2.2. 中继转像系统的设计

受到工艺影响,曲面接收器目前难以制造,且成本较高,所以选择中继转像系统将曲面微透镜阵列形成的曲面像转为平面像,便于平面接收器接收。

通过 Zemax 全局优化算法,在子眼阵列 MTF 值最大化和畸变最小化的约束条件下,最终确定了在曲率半径为 $R=30\text{ mm}$ 的曲面基底上,以六边形结构排列子眼阵列。子眼阵列在焦曲面上形成了曲面像,但由于技术限制,该曲面像无法直接被接收器接收。因此,需要设计一个中继转像系统,将子眼阵列形成的曲面像转换为平面像,以便接收器进行有效成像。为了确保成像质量,中继转像系统的物面曲率半径必须与子眼阵列的焦曲面曲率半径一致,同时其物面口径应大于子眼阵列焦曲面的口径,从而确保从子眼阵列发出的光线能够完全进入中继转像系统。

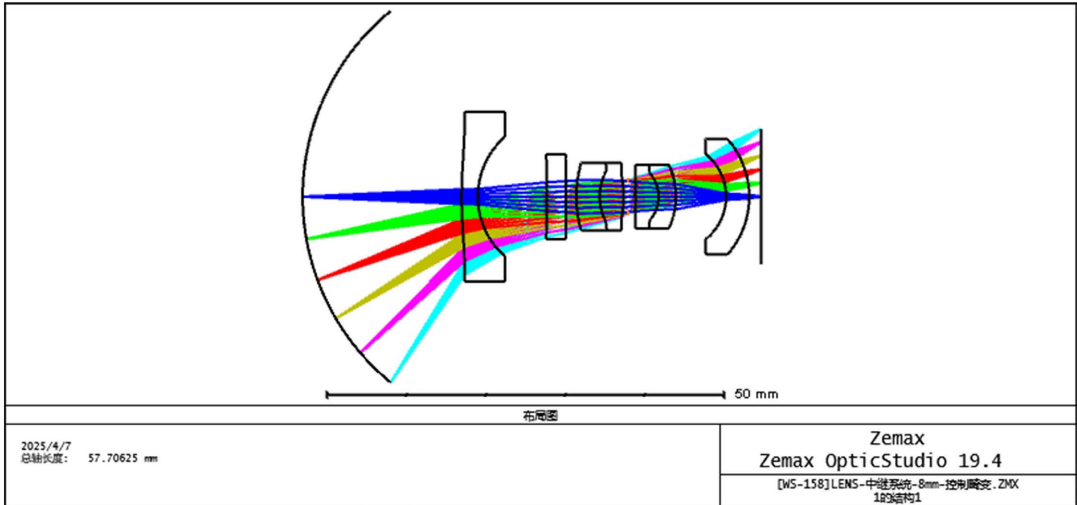


Figure 4. Schematic diagram of the structure of the relay image conversion system
图 4. 中继转像系统结构示意图

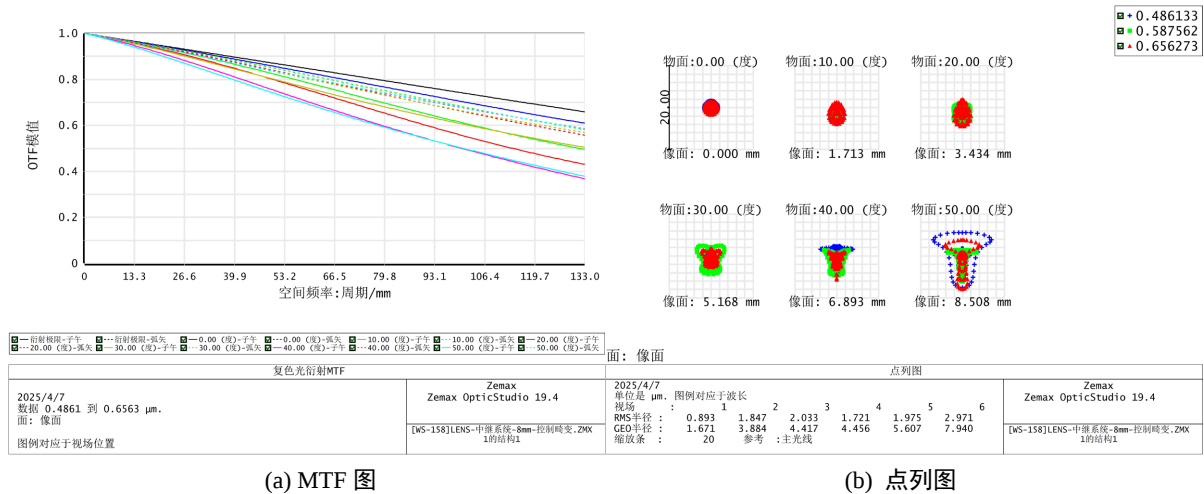


Figure 5. Simulation analysis diagram of the relay image system
图 5. 中继转像系统仿真分析图

中继转像系统通常可视为近物距的鱼眼镜头，其前 1 至 2 片镜片为负弯月镜片，主要作用是压缩视场。当光束以较大入射角照射到前光组的光学面时，经过光学系统成像后，子午和平面内的聚焦位置与波阵面参数可能完全不一致。因此，传统的赛德尔像差理论主要适用于轴对称光学系统的像差分析，而不适用于此类光学系统的像差计算，需要运用平面对称光学系统的波像差理论来计算系统的初始结构[15]。

基于平面对称光学系统的波像差理论，本文中继系统采用负弯月透镜与双高斯转像结构的复合架构作为初始光学拓扑。在优化过程中，通过引入非球面并策略性地将其置于光阑远端实现了系统轴向尺寸压缩与视场边缘像差的协同优化。负弯月透镜不仅能有效压缩视场，还能通过反向曲率设计补偿双高斯结构产生的场曲。此外，配合双高斯透镜的对称性对系统彗差进行了有效控制。

经过仿真优化分析，图 4 展示了中继系统的结构图，图 5 则展示了中继系统的成像质量。

从图 5(a)看出中继转像系统的 MTF 在截止频率处的值均大于 0.3，且各视场 RMS 半径值均小于像素尺寸，满足光学成像系统与接收器的匹配要求。

2.3. 复眼光学系统组合

在完成子眼阵列和中继转像系统的设计后，需要将其拼接成完整的复眼光学系统。在拼接过程中，必须遵循光瞳衔接原则，即子眼阵列的出瞳与中继转像系统的入瞳重合。由于系统采用离轴结构，拼接时不仅需要调整子眼的倾斜参数，还需对其偏心参数进行调整，确保每个子眼发出的主光线在进入中继转像系统前表面时，能够与中继转像系统中物面上各视场发出的主光线进入前表面的位置一致。

考虑到复眼光学系统中边缘视场与中心视场的差异较大，在分析系统像质时，需要对每个子眼的像质进行独立评估。在优化软件中，将每个子眼设为独立的多重结构，并确保在优化过程中，每个结构都能单独优化，同时保持除倾斜、偏心及与中继转像系统前表面距离不一致外，其余参数的一致性。最终，通过构建评价函数，对各个结构在 MTF 截止频率处的值和畸变进行约束，从而完成优化过程。

拼接后的复眼光学系统主阵列如图 6 所示：

复眼光学系统是二次成像系统，整个系统是由多个子眼拼接而成，需要对各位置子眼单独进行像质评估。由于系统是对称结构，且边缘视场像差较为敏感，本文仅展示一侧的中心视场与边缘视场的像质图。其中图 7 为系统 MTF 图，图 8 展示了系统的 RMS 半径值，图 9 展示了系统的场曲/畸变值。

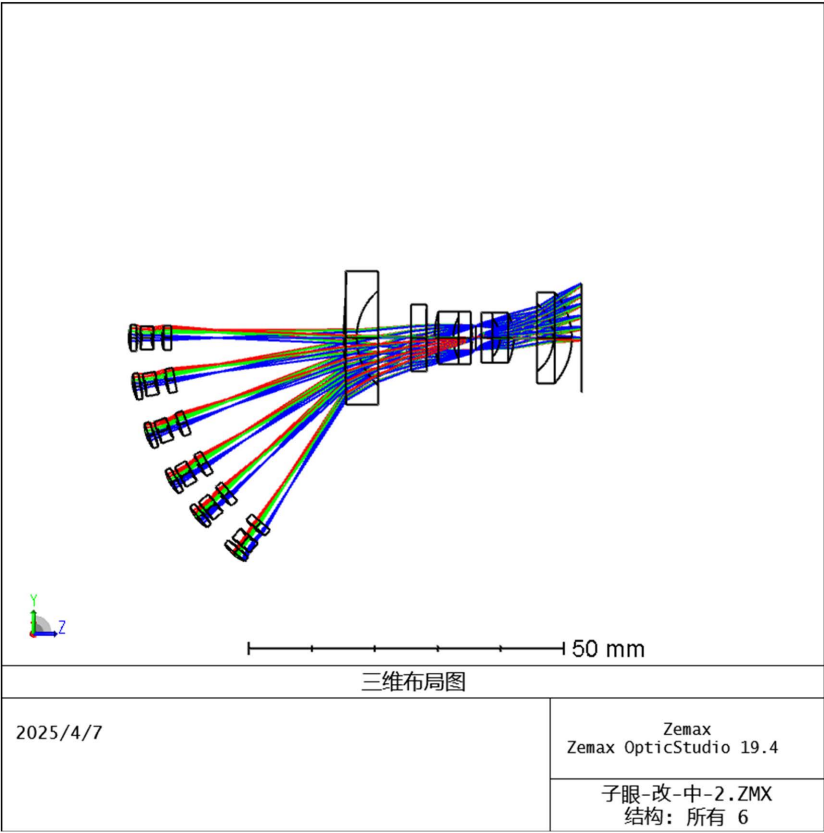


Figure 6. Schematic diagram of the structure of the compound vision system
图 6. 复眼光学系统结构示意图

复眼光学系统中心与边缘子眼 MTF 截止频率处的值如图 7 所示。从图 7 中可得，各子眼 MTF 在截止频率处的值均大于 0.3。0°和 50°视场子眼点列图如图 8 所示。各子眼全视场 RMS 半径值均小于接收器像元尺寸。场曲/畸变如图 9 所示，各结构子眼畸变值均小于 4%，完全符合光学成像系统与接收器的匹配要求。

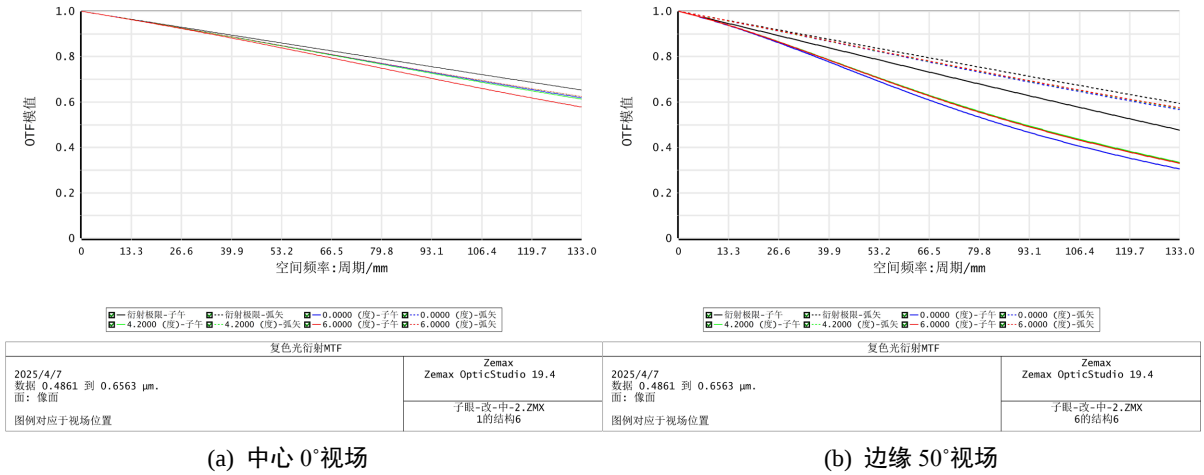


Figure 7. MTF simulation analysis diagram of compound vision system
图 7. 复眼光学系统 MTF 仿真分析图

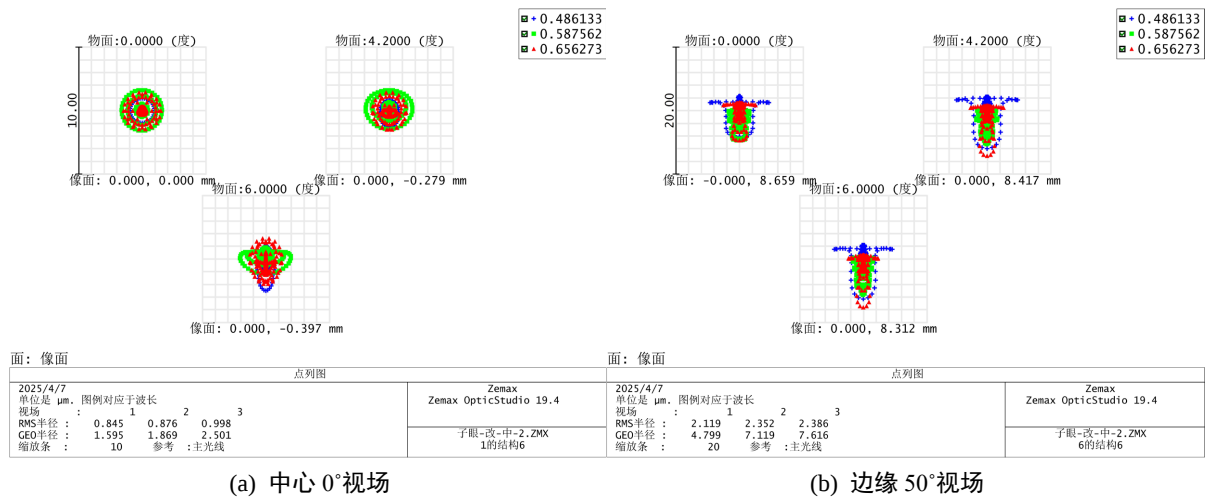


Figure 8. Diagram of the simulation analysis points of the double-vision optical system
图 8. 复眼光学系统仿真分析点列图

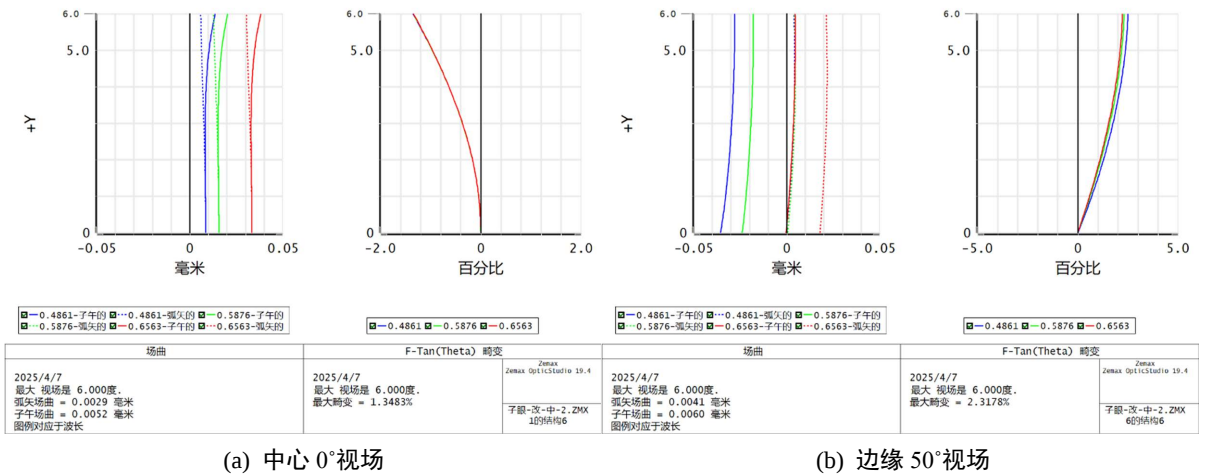


Figure 9. Simulation and analysis of field curvature/distortion diagram of a compound ophthalmic system
图 9. 复眼光学系统仿真分析场曲/畸变图

3. 公差分析

Table 2. Tolerance analysis results
表 2. 公差分析结果

蒙特卡洛样本百分比/%	几何 MTF 平均值
90	0.193 013 08
80	0.211 302 30
50	0.235 151 84
20	0.256 399 06
10	0.261 649 66

在光学系统的设计过程中，不仅要满足光学成像系统与接收器的匹配要求，还要满足产品生产加工的

需求，公差分析的目的在于了解系统在多大公差范围内，仍然能够满足成像要求。本文选用“几何 MTF 平均”的公差评价方法，用“灵敏度”模式，“蒙特卡洛运行数”选择“200”，根据光学成像系统公差表 Q5 等级对系统边缘结构进行公差分析。该系统边缘结构名义值为 0.27541188，具体结果如表 2 所示。分析表 2 可得由加工或装配等因素造成误差引起 MTF 截止频率处的值下降后，仍然有 90%的产品其 MTF 截止频率处的值高于 0.19301308，从结果可以看出大多数样品的 MTF 截止频率处的值大于 0.15，满足设计指标。

公差分配选用光学成像系统公差表中 Q5 等级，具体参数如表 3:

Table 3. Tolerance distribution range
表 3. 公差分配范围

名称	参数
折射率	±0.001
不规则度	±0.5
阿贝误差(%)	±0.1
厚度(mm)	±0.0375
表面偏心(mm)	±0.01
元件偏心(mm)	±0.0375
表面倾斜(°)	±1
元件倾斜(°)	±1

4. 无热化分析

在完成公差分析并确定系统对制造装配误差的容忍度后，我们发现光学性能的稳定性不仅取决于静态的几何误差控制，动态环境因素特别是温度变化也会影响光学系统的成像质量。为构建具有环境适应性的光学系统，需要将热力学变量纳入综合优化框架，通过光学被动消热差的方法保证光学系统在满足温度范围内仍然满足成像要求。根据无人机产品的工作环境标准，无人机应能够在-20℃至 50℃的温度范围内正常工作。为了满足无人机载光学系统在宽温度范围内的稳定性要求，本文通过 Zemax 热 - 光学耦合仿真对系统进行无热化分析，仿真温度范围覆盖-20℃至 50℃。当温度为基准温度 20℃时，系统的无热化分析仿真结果如图 7 和图 8 所示。

当温度为-20℃时，系统的无热化分析仿真结果如图 10 和图 11 所示。

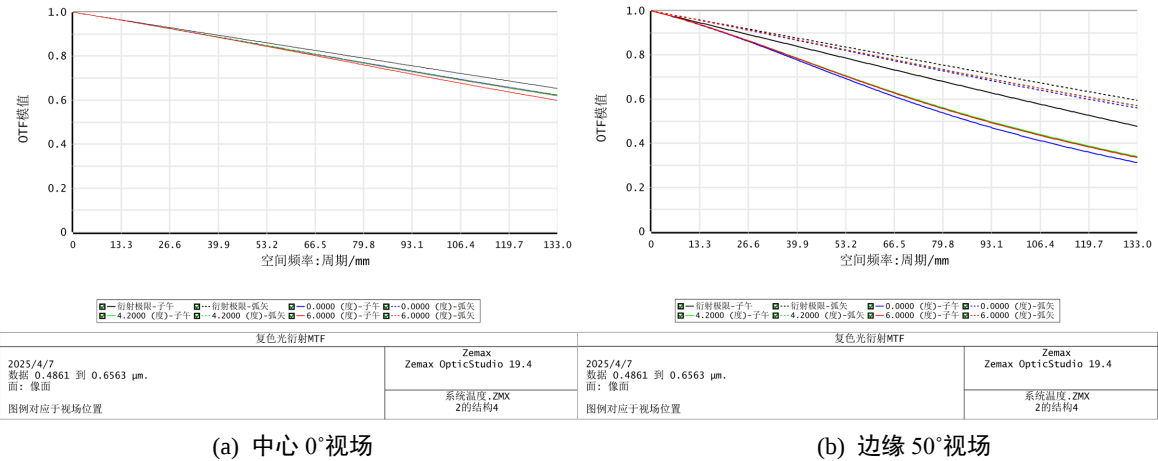


Figure 10. Simulated analysis of MTF diagram of compound vision system at -20°C
图 10. 复眼光学系统-20℃ 仿真分析 MTF 图

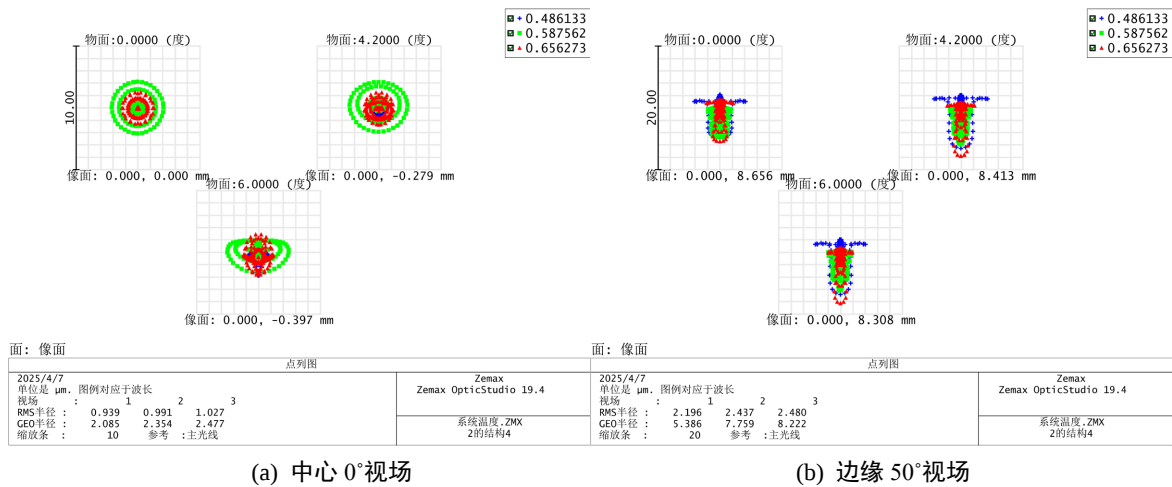


Figure 11. Diagram of the -20°C simulation analysis point of the compound vision system

图 11. 复眼光学系统-20°C 仿真分析点列图

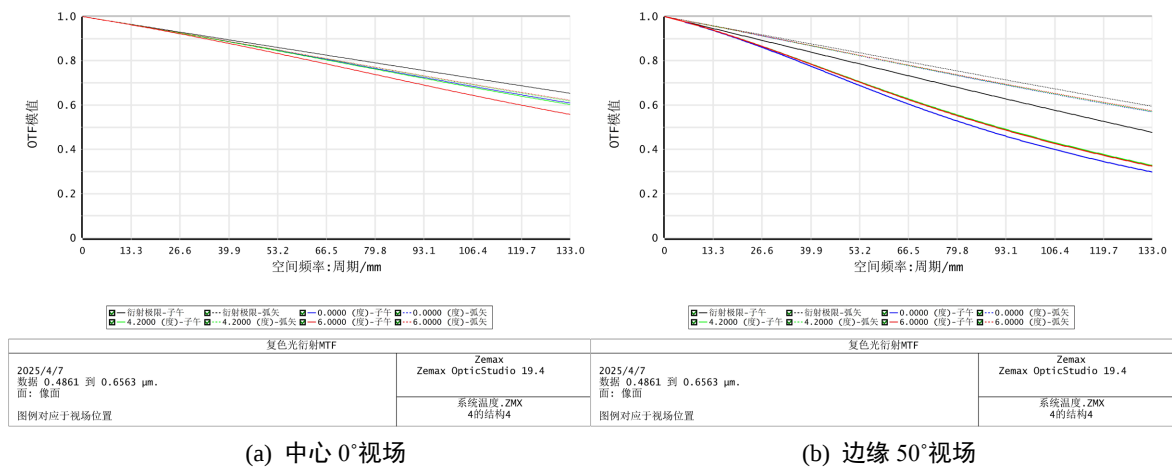


Figure 12. Simulated analysis of MTF diagram of compound vision system at 50°C

图 12. 复眼光学系统 50°C 仿真分析 MTF 图

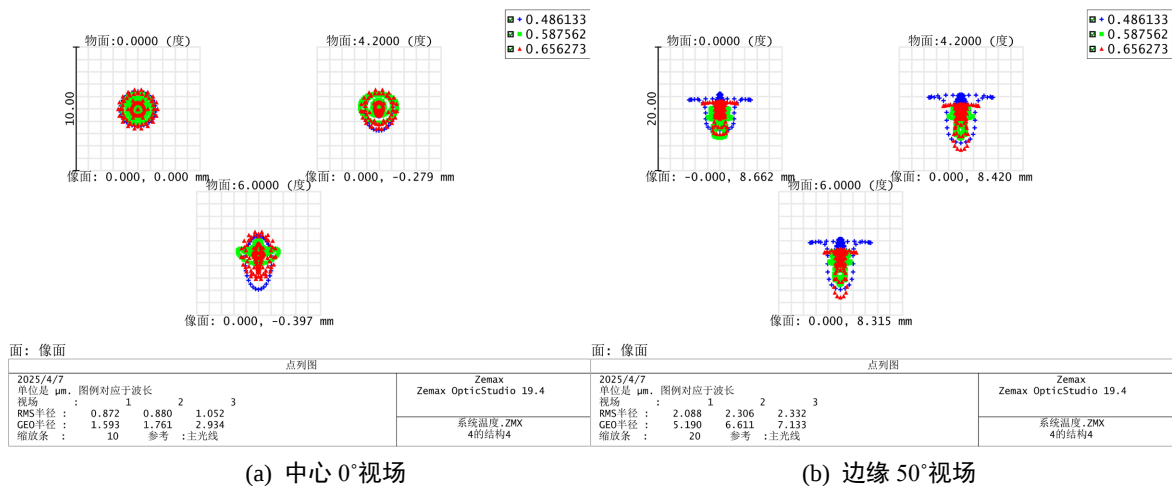


Figure 13. Diagram of the 50°C simulation analysis point of the compound vision system

图 13. 复眼光学系统 50°C 仿真分析点列图

当温度为 50℃ 时, 系统的无热化分析仿真结果如图 12 和图 13 所示。

经过 Zemax 无热化仿真分析验证, 该系统在温度范围为-20℃至 50℃时, 成像质量稳定。

5. 结论

本文设计了一款适用于无人机的小型化、大视场、高分辨率曲面复眼相机系统, 通过适配转像系统将曲面子眼阵列形成的焦曲面像转化为平面像, 便于接收器接收。经拼接与系统优化后, 系统总体积为 60 mm × 60 mm × 72 mm, 焦距为 3.75 mm, 满足对地距离 500 m 实现 0.5 m 地面分辨率的要求。系统全视场在奈奎斯特截止频率处的 MTF 值高于 0.3, 子眼全视场 RMS 半径小于像元尺寸, 畸变值小于 4%。公差分析结果表明, 系统经过合理的公差分配后, 90% 的样品在截止频率处的 MTF 值仍高于 0.15, 成像质量良好。无热化分析结果表明, 系统在-20℃至 50℃的温度范围内成像质量稳定。该系统结构简单、加工难度低, 可广泛应用于大视场成像、军事目标探测与识别、导航定位等多个领域。

基金项目

国家自然科学基金青年基金(62303441); 中国科学院青年创新促进会(2021233); 上海市优秀学术带头人(22XD1424500)。

参考文献

- [1] Horridge, G.A. (1977) The Compound Eye of Insects. *Scientific American*, **237**, 108-120. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0777-108>
- [2] Afshari, H., Popovic, V., Tasci, T., Schmid, A. and Leblebici, Y. (2012) A Spherical Multi-Camera System with Real-Time Omnidirectional Video Acquisition Capability. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, **58**, 1110-1118. <https://doi.org/10.1109/tce.2012.6414975>
- [3] Druart, G., Guérineau, N., Haïdar, R., Lambert, E., Tauvy, M., Théas, S., *et al.* (2008) MULTICAM: A Miniature Cryogenic Camera for Infrared Detection. *Proceedings of SPIE*, **6992**, 69920G. <https://doi.org/10.1117/12.779272>
- [4] Di, S., Lin, H. and Du, R. (2009) An Artificial Compound Eyes Imaging System Based on MEMS Technology. 2009 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guilin, 19-23 December 2009, 13-18. <https://doi.org/10.1109/robio.2009.5420831>
- [5] 蒋宁, 贾继强, 金灿强, 等. 无人机载面阵数字相机光学镜头设计[J]. 装备制造技术, 2012(6): 35-37.
- [6] 朱海滨, 张远健, 朱大略, 等. 小型无人机载高分辨率物镜设计[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 4-8.
- [7] 刘仲宇, 张涛, 李嘉全, 等. 超小型无人机相机系统关键技术研究[J]. 光电工程, 2013, 40(4): 80-85.
- [8] 檀立刚, 骆明伟, 李捷, 等. 无人机光电设备对地目标单站无源定位方法[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 599-610.
- [9] Wilburn, B., Joshi, N., Vaish, V., Talvala, E., Antunez, E., Barth, A., *et al.* (2005) High Performance Imaging Using Large Camera Arrays. *ACM Transactions on Graphics*, **24**, 765-776. <https://doi.org/10.1145/1073204.1073259>
- [10] 江云峰, 罗敏, 何红星, 等. 鱼眼镜头的研究进展及应用[J]. 红外技术, 2023, 45(4): 342-351.
- [11] 付跃刚, 赵宇, 刘智颖, 等. 基于视场拼接方法的仿生复眼光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 422-429.
- [12] 许黄蓉, 刘晋亨, 张远杰, 等. 无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 224-230.
- [13] 范晨, 刘钧, 高明, 等. 六边形环带排布的共光路复眼光学系统设计[J]. 中国光学, 2023, 16(1): 158-173.
- [14] 李文轩, 胡源, 张凯, 等. 仿生复眼系统的视场重叠率[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 233-240.
- [15] 吕丽军, 吴学伟. 鱼眼镜头初始结构的设计[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 105-114.