

文章编号:1007-2780(2025)10-1482-08

基于微透镜阵列的仿生复眼彩色系统设计 及硬件模型优化

王玉坤^{1*}, 刘羽萱², 徐淑卿¹

(1. 中国人民解放军91550部队, 辽宁 大连, 116000;
2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:复眼视觉系统具有大视场、体积小和对运动敏感的特性,特别适合于广域运动目标探测、识别和光学自主导航。本研究为了实现仿生复眼系统的RGB三通道彩色成像,进行了仿生复眼彩色成像系统光学仿真并研制了样机。该样机共包含16个子眼,单个子眼焦距为15 mm。基于该样机进行了仿生复眼彩色成像性能验证实验。实验结果表明,该系统的子眼视场为22.62°,总视场达85.02°,在60 cm距离处其分辨率达到6 lp/mm,且具有良好的成像对比度。此外,还进行了场景成像实验以验证其成像性能。结果表明,仿生复眼彩色成像系统可满足复杂环境下广域目标的探测、三维定位和识别等应用。

关键词:复眼视觉系统;复眼彩色成像;复眼光学设计;子图像位置调整

中图分类号:O436;TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2025-0118 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2025-0118

Design and hardware model optimization of bionic compound eye color system based on microlens array

WANG Yukun^{1*}, LIU Yuxuan², XU Shuqing¹

(1. Unit 91550 of the Chinese People's Liberation Army, Dalian 116000, China;
2. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The compound eye vision system features a wide field of view, small size and sensitivity to motion, making it particularly suitable for wide-area moving target detection, recognition and optical autonomous navigation. In this study, to achieve RGB three-channel color imaging of the bionic compound eye systems, an optical simulation of the bionic compound eye color imaging system was conducted and a prototype was developed. This prototype contains 16 sub-eye systems, with a focal length of 15 mm for each sub-eye system. Based on this prototype, performance verification experiments of bionic compound eye color imaging were carried out. The experimental results show that the field of view of each sub-eye is 22.62°, and the total field of view reaches 85.02°. At a distance of 60 cm, its resolution reaches 6 lp/mm, with good imaging contrast. Additionally, scene imaging experiments were performed to validate its imaging performance. These results demonstrate that the bionic compound eye color imaging system can meet the requirements

收稿日期:2025-06-08;修订日期:2025-07-29.

*通信联系人, E-mail:126864@qq.com

for detecting, three-dimensional positioning, and recognizing wide-area targets in complex environments.

Key words: compound eye vision system; compound eye color imaging; compound eye optical design; sub image position adjustment

1 引言

视觉是动物获取外界信息的主要方式,所以作为视觉器官的眼睛对动物来说尤为重要,直接决定了动物的生存方式和生活习性。在自然界中主要有2种视觉系统——哺乳动物的单眼视觉系统和分布于节肢类动物中的复眼视觉系统^[1]。人眼是大家最为熟悉的单眼视觉系统,由于其看得清、看得远的特性能够获取更多环境细节,所以需要更大的大脑以处理海量的数据信息。当前设计的光学系统结构,如数码相机、望远镜、显微镜等,大多是这种类似人眼原理的单孔径光学系统。但单孔径光学系统的视场受限,对运动目标不够敏感。蜻蜓、蜜蜂等节肢动物的复眼视觉系统结构与人眼不同,其由很多分布在曲面上的小眼组成^[2],从而使得复眼视觉系统视场更大,对运动目标更敏感,其特性和人眼特性互补,更适合于广域目标探测和跟踪^[3-5]。

复眼视觉系统的特性引起了科研人员的广泛关注,仿生复眼技术也是当前光学领域热门的研究方向之一^[6-10]。这种仿照复眼结构的阵列光学系统被应用于照明匀光、光场成像、成像系统微型化、广域探测等诸多领域^[11-13]。其中,照明匀光、光场成像、成像系统微型化等方向均以平面复眼为主^[14-16],以提升系统性能和获取信息量。而广域探测领域需获取更大视场,从而更依赖生物复眼这种曲面分布结构^[17-19]。

目前已经有多种用于广域目标探测的曲面复眼结构被提出。早在2013年,国外团队就提出了曲面复眼系统^[20],每个微透镜下面对应一个光电二极管进行光电信号转化。这种曲面复眼系统虽然能够探测接近180°的大视场,但其分辨率很低,探测距离近,难以在广域场景应用。2017年,中国科学院长春光机所的史成勇团队提出基于二次成像原理的曲面复眼系统^[21],通过引入一个中继系统,将曲面透镜阵列所成的曲面像转为平面像,从而被CMOS图像传感器采样为数字图像,为曲面复眼系统实现大视场和高分

辨率提供了可能。史成勇等人后又陆续提出异构复眼系统,实现了同一复眼系统同时获取不同分辨率的目标信息,为广域探测的快速探测和精准识别提供了新方向。中国科学院西安光机所的鱼卫星团队提出了用于目标测速的仿生复眼系统^[22]。中国科学技术大学的王克逸团队提出了折转透镜的曲面复眼系统^[23],实现了广域三维目标定位。除此之外,长春理工大学、西安工业大学、天津大学、北京理工大学、四川大学等国内多个高校团队均在复眼成像系统方面取得了突出成果^[24-31]。

虽然国内科研院校在曲面复眼系统研制上成果显著,但目前提出的系统大多采集的是黑白图像^[32],针对曲面复眼系统的设计和成像讨论不足^[33]。彩色图像相对黑白图像信息更丰富,更有利于目标识别。但曲面复眼系统所成的复眼图像包含很多子图像,扩展为彩色成像系统后,所有子眼的色差较难平衡。另外,每个子图像由黑白的单通道扩展为彩色三通道图像后,其图像处理难度更大。本研究根据当前曲面复眼系统采用的二次成像原理,提出仿生复眼彩色成像系统设计和研制,并基于研制的系统进行了复眼彩色成像性能和室内外随机场景的实验验证,验证了仿生复眼的彩色成像性能,也为仿生复眼彩色成像系统的深度研究和优化奠定了基础。

2 仿生复眼彩色成像系统仿真和研制

2.1 仿生复眼彩色成像系统仿真

在复杂地面环境中,大视场彩色成像系统更有利于目标的探测和识别。因此,我们设计了一种仿生复眼彩色成像系统,系统主要由3部分构成:曲面排列的子眼阵列、二次成像的光学中继系统和光学图像数字采样的CMOS图像传感器。子眼阵列对场景进行成像,光学中继系统将子眼阵列所成的曲面像二次成像到CMOS图像传感器上,由CMOS图像传感器采样为数字图像,以进行后续的图像处理。

图 1 为仿生复眼彩色成像系统光学结构图。在该系统仿真中,半视场内设置了 3 个子眼通道,各子眼均为单透镜形式。每个子眼口径为 10 mm,视场为 24°,工作波段为 400~700 nm。光学中继系统由 9 片透镜组成,将子眼阵列所成的曲面像转换到 CMOS 图像传感器上。由于光学系统中心和边缘成像存在差异且这种差异很难消除,从

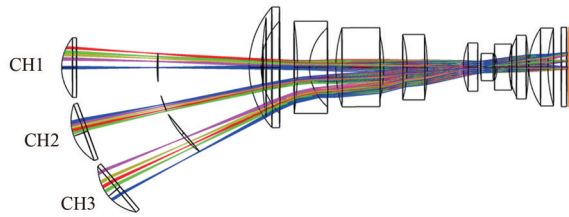


图 1 仿生复眼彩色成像系统的光学结构
Fig. 1 Optical architecture of bio-inspired compound eye color imaging system

而导致复眼彩色成像系统各子眼通道成像性能不一致,且各子眼自身的中心和边缘成像性能也有差异。我们在设计仿真中优化了各子眼光轴以降低不同通道间的成像差异。

图 2 为各子眼通道的光学传递函数(OTF)曲线和点列图。从 MTF 曲线可以看出,各通道的 MTF 在 50 lp/mm 奈奎斯特频率处均大于 0.3,满足系统成像需求。中心子眼的成像效果最好;边缘子眼受中继系统影响较大,成像效果稍差,但依然能够满足成像需求。从点列图可以看出,CH1、CH2 和 CH3 各通道子眼的艾里斑半径分别为 3.384 μm 、3.39 μm 和 3.367 μm 。光斑 RMS 半径分别为 2.607 μm 、2.963 μm 和 3.363 μm ,主光线设计的光斑 RMS 均在艾里斑范围内。由于彩色成像系统不同波长下的光斑大小不一致,而造成一定色差,影响色彩还原。

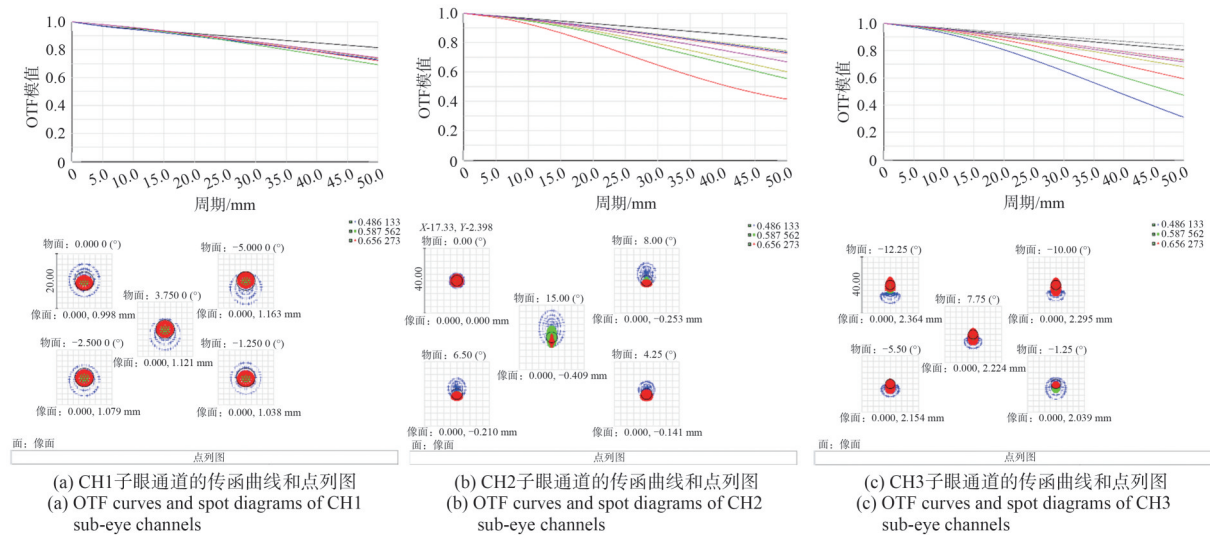


图 2 子眼通道的光学传递函数曲线和点列图
Fig. 2 OTF curves and spot diagrams of sub-eye channels

2.2 仿生复眼彩色成像系统研制

根据仿生复眼彩色成像系统的结构和仿真,我们采用 3D 打印制作了子眼阵列的支撑结构,并采购相应参数的玻璃透镜安装到支撑结构上,从而形成子眼阵列。如图 3(a)所示,支撑结构不仅提供了子眼透镜的支撑还能够有效避免相邻子眼之间的干扰。子眼透镜呈圆形分布,共 4 圈子眼,但最圈子眼由于光学中继系统限制没有参与成像。参与成像的子眼共 3 圈 16 个,子眼口径为 10 mm,焦距为 15 mm。

如图 3(b)所示,子眼阵列、中继系统和 CMOS 图像传感器集成后形成仿生复眼彩色成像系统样机。图像采集单位采用大恒图像的 ME2P-2621-15U 型号相机,芯片为辰芯的 GMAX0505 芯片,其像素数量为 5 120×5 120,像素大小为 2.5 μm 。实际成像时采用 2×2 Binning 模式,等效像元尺寸为 5 μm (实验时也可直接选用 5 μm 像元尺寸的探测器)。设计的光学系统艾里斑半径小于等效像元尺寸,可以满足系统采样需求。该系统通过 USB3.0 接口与电脑相连,从而实时采集和显示图像。

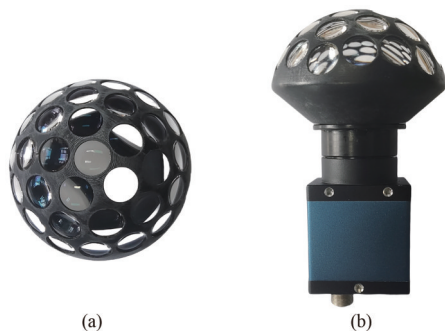


图3 (a) 子眼阵列; (b) 仿生复眼彩色成像系统样机。
Fig. 3 (a) Sub-eye array; (b) Prototype of bionic compound eye color imaging system.

3 仿生复眼彩色成像性能测试

为了验证仿生复眼彩色成像系统的成像性能,我们进行了一系列实验:测试系统的子眼视场和整体视场;对 ISO12233 分辨率测试板进行成像,验证系统分辨率;对黑白相间的棋盘格进行成像并对图像进行数值处理,分析了系统成像对比度。

3.1 系统视场验证

为了验证研制的仿生复眼彩色成像系统子眼和全局视场大小,我们在系统前方 60 cm 处放置一个刻度尺,仿生复眼彩色成像系统的单一子眼和所有子眼分别对刻度尺进行成像,通过刻度尺范围即可计算出单一子眼视场和全局视场大小。实验结果如图 4 所示,图 4(a)为单一子眼对刻度尺的成像图片,在 60 cm 距离处覆盖 24 cm 空间大小,其视场角为 22.62°。图 4(b)为所有子眼对刻度尺的成像图片,左右两个边缘子眼分别获取了整体视场的两个边缘。根据实验结果可

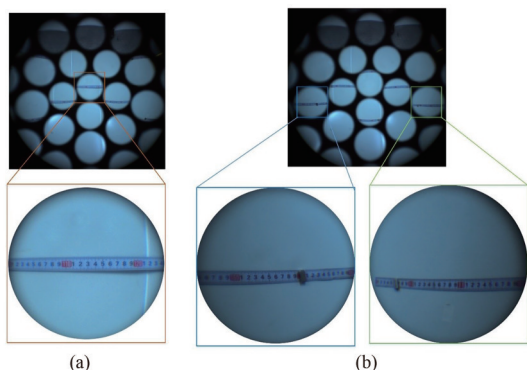


图4 (a) 单个子眼视场验证; (b) 全局视场验证。
Fig. 4 (a) Verification of single ommatidium field of view; (b) Global field of view verification.

知,左右两个边缘子眼在 60 cm 距离处整体覆盖 110 cm 空间大小,其视场角为 85.02°。

3.2 系统分辨率测试

为了验证仿生复眼彩色成像系统的分辨能力,我们采用该系统对 ISO12233 分辨率测试板进行成像。图 5(a)为仿生复眼彩色成像系统在距离 ISO12233 分辨率测试板 60 cm 处拍摄的图片,我们随机选取了一个子眼图像进行局部放大。从图 5(b)放大图中可以看出,图像能够分辨 6 lp/mm 时的线条,即在 60 cm 处可分辨 0.083 mm 大小的目标。在不考虑远距离空气扰动情况下,等价计算可知,该系统可分辨 6 km 处 0.83 m 的目标,能够满足复杂场景下关键车辆、人物等目标的高清识别。从图 5(b)中单子眼图像可以看出,子眼图像边缘色彩存在色差,且各子眼边缘色差也不一致。我们将在接下来的工作中重点解决该问题。

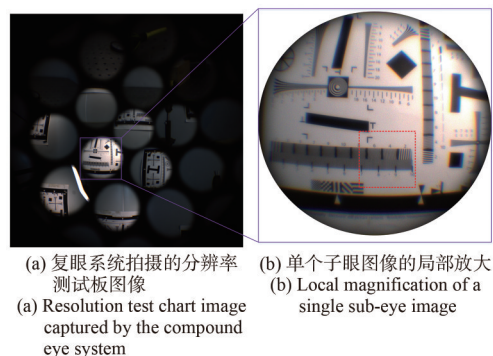


图5 随机子眼分辨率测试

Fig. 5 Random ommatidium resolution test

3.3 系统成像对比度实验

成像系统的对比度可以衡量系统分辨不同亮度或颜色区域的能力,直接影响图像的清晰度和细节表现。为了验证该仿生复眼彩色成像系统的清晰度和细节表现,我们采用研制的样机对黑白间隔的棋盘格进行成像,提取了棋盘格图像中 RGB 三通道图像,并对 3 个通道纵向中心一行的像素值进行对比度数值分析。图 6(a)为拍摄的原始棋盘格图像,图 6(b)为中心子眼放大图像。图 6(c~e)为红、绿、蓝 3 个通道图像各自的对比度曲线。Michelson 对比度公式为:

$$C_{\text{Michelson}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (1)$$

其中: I_{max} 和 I_{min} 分别表示图像中最大和最小亮度

值(灰度值)。根据 Michelson 对比度公式可计算出红、绿、蓝三通道图像对比度分别为 0.66、0.65 和 0.68。各通道亮度的最大值和最小值以平均值计算。

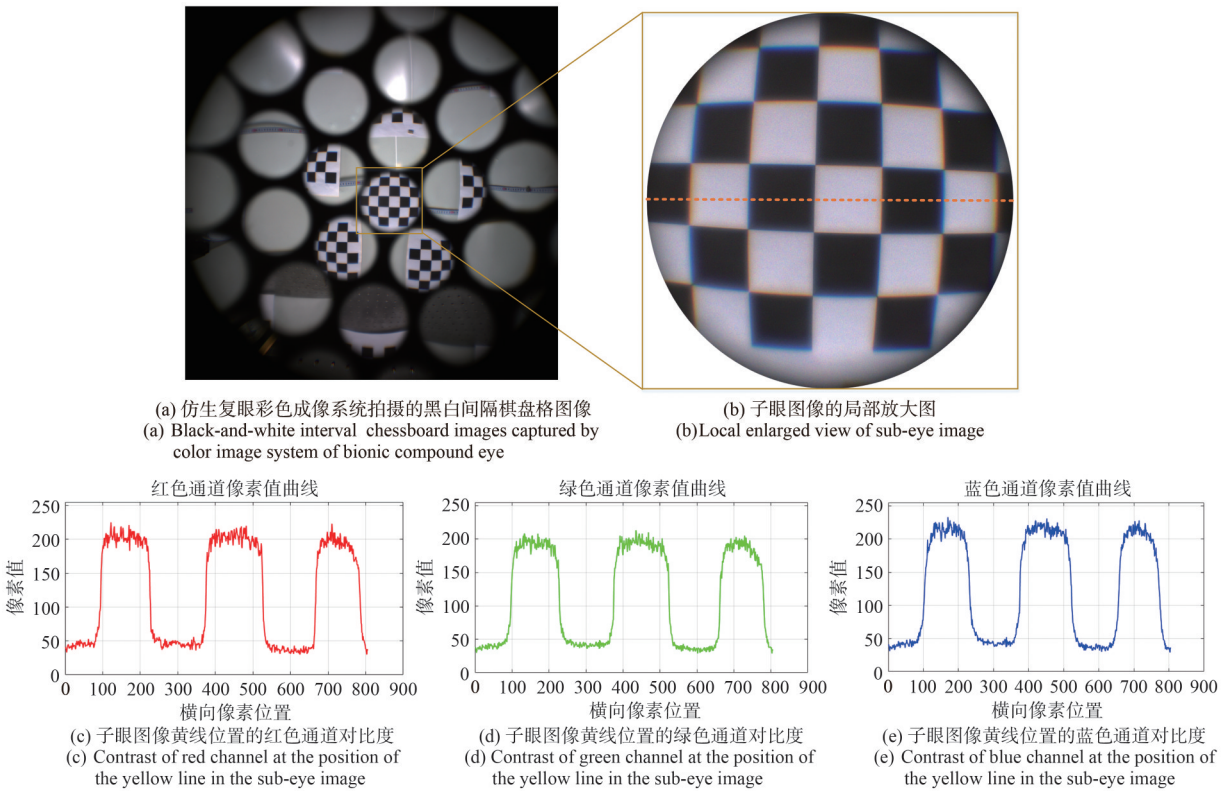


图 6 对比度实验结果

Fig. 6 Results of contrast experiment

4 仿生复眼系统成像实验

仿生复眼彩色成像系统采集的每个子图像均为三通道 RGB 彩色图像。为了进一步验证系统的彩色成像性能,我们对室内彩色目标和室外随机场景进行了成像实验。该系统子眼阵列所成的一次像,经过光学中继系统二次成像是一个倒像。由于复眼图像是图像阵列,所以中继系统的倒像会打乱子眼阵列顺序,故原始拍摄的复眼图像不能看出完整的场景轮廓。

4.1 复眼系统室内成像实验

图 7(a)为研制的仿生复眼彩色成像系统样机拍摄的室内场景图像。为了验证系统彩色成像性能,我们在场景中放置了一个 24 色标准色卡。从色卡成像可以看出,各颜色成像性能良好。场景中绿色盆栽和红色门框成像均与真实色彩一致。由于系统设计时子眼阵列和中继系统均成倒像,导致系统最终复眼图像中各子眼图像位

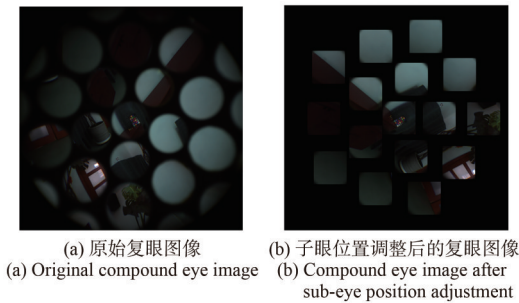


图 7 室内成像实验结果

Fig. 7 Indoor imaging experiment result

置颠倒,所以难以观测出完整场景轮廓。

为了复原子眼位置,我们做了一定的算法处理。在提取子眼图像时,选择采用内切方形来提取。子眼位置调整算法流程共 3 步,具体操作如下:

(a) 计算原始图像中每个子眼的中心坐标,并校正中心坐标位置;

(b) 创建新图像,并计算上下左右均翻转后的子眼中心坐标;

(c) 从原始图像提取子眼图像放置于新图像中调整后的位置。

通过 Matlab 编程将复眼图像中各子眼位置进行调整。图 7(b)为子眼位置调整后的复眼图像,已经恢复了场景中各物体正确的位置关系。

复眼系统的每个子眼都会对场景中的某个局部成像,子图像汇集到一起,形成总图像。为了防止子眼间相互串扰,在子眼之间设置了光阑。相邻子眼之间的光阑遮挡导致相邻子图像之间有一定间隔,该效应从图 7 中可以直观看出。这种间隔会造成一定的像元浪费,故间隔应尽量小,以增加探测器像元利用率。当前光阑是采用树脂 3D 打印而成,3D 打印的精度导致光阑不能太小。可采用高精密机械加工或微纳加工方法缩小光阑尺寸,从而减小像元浪费提升像元利用率。

4.2 复眼系统室外随机场景成像实验

为了进一步验证研制的仿生复眼彩色成像系统样机的成像能力,我们对室外随机场景进行了成像实验。图 8 为两个随机场景的原始成像图和子眼位置调整后的图像。在室外场景中能够更明显地区别出子眼位置调整前后的变化。子眼位置调整后可分辨出完整的场景信息。图 8(a)和图 8(b)对室外黄色花朵能够很好地成像,图 8(c)和图 8(d)中对粉色花朵也能够很好地成像。室外场景实验反应了本系统具有良好的色彩还原能力,能够还原出场景真实色彩。复眼系统不同于单眼系统,其由很多个小眼组成,每个小眼对场景的一部分进行成像。该特性使得复眼系统可在目标探测和跟踪过程中实现全局扫描探测目标,局部单个子眼进行高速目标跟踪,这将极大地提升目标跟踪效率,降低目标丢失率。

参 考 文 献:

- [1] LEE L P, SZEMA R. Inspirations from biological optics for advanced photonic systems [J]. *Science*, 2005, 310(5751): 1148-1150.
- [2] ROSSEL S, WEHNER R. Polarization vision in bees [J]. *Nature*, 1986, 323(6084): 128-131.
- [3] WU Q, ZHANG H X, WANG T S, *et al.* Structure optimization of heterogeneous compound eye camera for improving the detection performance [J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 42176.
- [4] 于晓丹,张远杰,王元元,等. 小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(7): 0722003.

YU X D, ZHANG Y J, WANG Y Y, *et al.* Optical design of a compound eye camera with a large-field of view for

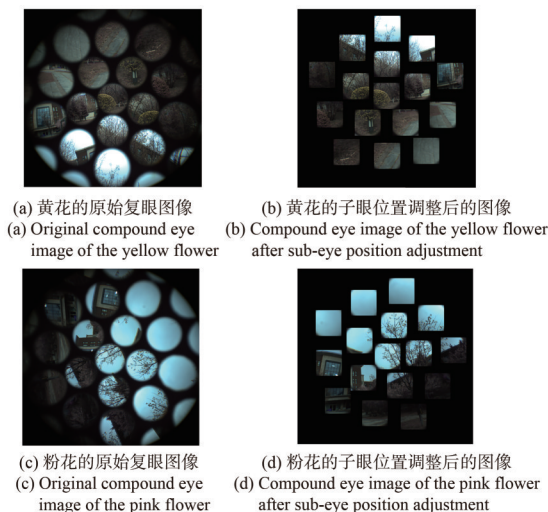


图 8 室外成像实验结果

Fig. 8 Outdoor imaging experiment results

5 结 论

本文设计和研制了一种仿生复眼彩色成像系统样机,该系统具有 16 个子眼,每个子眼焦距为 15 mm,视场为 22.62° ,系统总视场达 85.02° 。为了验证该样机的成像性能,我们设计了一系列验证实验。实验结果表明,该系统可分辨 6 km 处 0.83 m 大小的目标,各通道图像对比度在 0.65 以上,具有良好的成像性能。为了进一步验证系统能力,还设置了室内和室外场景的成像实验,从实验结果可以看出,该样机具有良好的色彩还原能力和成像能力。该样机也存在一些问题,比如中心子眼和边缘子眼成像性能有差异,各子眼色差不完全一致。这些问题将是我们下一步研究的重点。本研究为仿生复眼彩色成像和广域目标识别奠定了基础。在将来的工作中,我们将基于该系统开展目标探测、跟踪、识别和三维定位的工作。

- unmanned aerial vehicles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0722003. (in Chinese)
- [5] 许黄蓉. 曲面仿生复眼成像光学系统关键技术研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2022.
- XU H R. Research on key technology of biomimetic curved compound-eye imaging optical system [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese)
- [6] LIU Y Y, WEI J X, WANG T Y, *et al.* A bionic compound eye for quantitative detection of exosomes [J]. *Nano Research*, 2025, 18(3): 94907203.
- [7] WANG Y Y, SHI C Y, XU H R, *et al.* A compact bionic compound eye camera for imaging in a large field of view [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106705.
- [8] MEGLIĆ A, ILIĆ M, PIRIH P, *et al.* Horsefly object-directed polarotaxis is mediated by a stochastically distributed ommatidial subtype in the ventral retina [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(43): 21843-21853.
- [9] WU Q, ZHANG S S, LIAO W X, *et al.* Heterogeneous compound eye camera for dual-scale imaging in a large field of view [J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 45143.
- [10] 刁啸天. 无人机载复眼光学系统设计[D]. 西安:西安工业大学, 2024.
- XI X T. UAV on-board compound vision system design [D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2024. (in Chinese)
- [11] LIU J Y, CHU J K, ZHANG R, *et al.* Wide field of view and full stokes polarization imaging using metasurfaces inspired by the stomatopod eye [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(6): 1137-1146.
- [12] CURREA J P, SONDHI Y, KAWAHARA A Y, *et al.* Measuring compound eye optics with microscope and microCT images [J]. *Communications Biology*, 2023, 6(1): 246.
- [13] XU H R, ZHANG Y J, WU D S, *et al.* Biomimetic curved compound-eye camera with a high resolution for the detection of distant moving objects [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6863-6866.
- [14] DENG H X, GAO X C, MA M C, *et al.* Catadioptric planar compound eye with large field of view [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12455-12468.
- [15] KOGOS L C, LI Y Z, LIU J N, *et al.* Plasmonic ommatidia for lensless compound-eye vision [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1637.
- [16] ZHANG L, ZHAN H Y, LIU X Y, *et al.* A wide-field and high-resolution lensless compound eye microsystem for real-time target motion perception [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8(1): 83.
- [17] KEUM D, JANG K W, JEON D S, *et al.* Xenos peckii vision inspires an ultrathin digital camera [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 80.
- [18] MA M C, ZHANG Y, DENG H X, *et al.* Super-resolution and super-robust single-pixel superposition compound eye [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106699.
- [19] HU Z Y, ZHANG Y L, PAN C, *et al.* Miniature optoelectronic compound eye camera [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5634.
- [20] SONG Y M, XIE Y Z, MALYARCHUK V, *et al.* Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye [J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 95-99.
- [21] SHI C Y, WANG Y Y, LIU C Y, *et al.* SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32333-32345.
- [22] 刘韬, 郭文阁, 朱帅民, 等. 曲面仿生复眼测速技术研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 134-141.
- LIU T, GUO W G, ZHU S M, *et al.* Velocity measurement technology of curved bionic compound eye [J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 134-141. (in Chinese)
- [23] MA M C, LI H, GAO X C, *et al.* Target orientation detection based on a neural network with a bionic bee-like compound eye [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10794-10805.
- [24] YANG Q, LI M J, BIAN H, *et al.* Bioinspired artificial compound eyes: characteristic, fabrication, and application [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(10): 2100091.
- [25] 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): 20200435.

- LI W X, HU Y, ZHANG K, *et al.* Field of view overlap rate of bionic compound eye system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200435. (in Chinese)
- [26] 陈阳,高明,胡雪蕾,等. 共口径宽光谱复眼光学系统设计[J]. 光子学报,2020,49(3):0322002.
CHEN Y, GAO M, HU X L, *et al.* Design of co-aperture wide spectrum compound eye optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0322002. (in Chinese)
- [27] SHEN C, ZHAO X, WU X D, *et al.* Multiaperture visual velocity measurement method based on biomimetic compound-eye for UAVs [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(7): 11165-11174.
- [28] 袁泽强,谷宇章,邱守猛,等. 多相机式仿生曲面复眼的标定与目标定位[J]. 光子学报,2021,50(9):0911005.
YUAN Z Q, GU Y Z, QIU S M, *et al.* Calibration and target position of bionic curved compound eye composed of multiple cameras [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911005. (in Chinese)
- [29] 陈颖,罗琳,金伟其,等. 田字型四孔径红外仿生复眼的目标定位[J]. 光学精密工程,2024,32(12):1836-1848.
CHEN Y, LUO L, JIN W Q, *et al.* Target positioning method for tian-shaped four-aperture infrared biomimetic compound eyes [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(12): 1836-1848. (in Chinese)
- [30] 李文杰,刘学斌,杨洁,等. 大视场高分辨率无色差的复眼相机阵列系统[J]. 液晶与显示,2024,39(10):1304-1312.
LI W J, LIU X B, YANG J, *et al.* Compound eye camera array system with large field of view, high-resolution and achromatic aberration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(10): 1304-1312. (in Chinese)
- [31] 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(中英文),2023,16(1):158-173.
FAN C, LIU J, GAO M, *et al.* Design of compound eye optical system with hexagonal band arrangement and common optical path [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 158-173. (in Chinese)
- [32] WANG J, ZHOU W N, LIU Y T, *et al.* Biomimetic compound eyes with gradient ommatidium arrays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(37): 44503-44512.
- [33] DAI B, ZHANG L, ZHAO C L, *et al.* Biomimetic apposition compound eye fabricated using microfluidic-assisted 3D printing [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6458.

作者简介:



王玉坤,男,学士,高级工程师,2002年于吉林大学获得学士学位,主要从事光学探测方面的研究。
E-mail:126864@qq.com