

广域高分辨率计算光学成像系统研究进展

刘飞^{1,2,3**}, 吴晓琴^{1,2}, 赵琳^{1,2}, 段景博^{1,2}, 李江勇¹, 邵晓鹏^{1,2,3*}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071;

³西安电子科技大学前沿交叉研究院, 陕西 西安 710071

摘要 为了克服光电成像系统中广域和高分辨率相互制约的问题, 想要在获得更大成像视场范围的同时获取更多的细节信息, 广域高分辨率计算光学成像技术应运而生。截至目前, 计算光学成像系统已有大量研究成果, 且在多个领域中被广泛应用。对国内外相关的广域高分辨率计算光学成像系统中的单镜扫描系统、多探测器拼接系统、多尺度成像系统及多镜头拼接系统进行了系统阐述, 分析总结了优缺点, 并对广域高分辨率计算光学成像系统的未来发展做了展望。

关键词 成像系统; 计算成像; 光学系统; 广域; 高分辨率

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811001

Research Progress of Wide-Field and High-Resolution Computational Optical Imaging System

Liu Fei^{1,2,3**}, Wu Xiaoqin^{1,2}, Zhao Lin^{1,2}, Duan Jingbo^{1,2}, Li Jiangyong¹,
Shao Xiaopeng^{1,2,3*}

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

³Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract In order to overcome the mutual restriction between wide-field and high-resolution in photoelectric imaging system, wide-field and high-resolution computational optical imaging technology came into being in order to obtain more detailed information while obtaining a larger imaging field of view. So far, the computational optical imaging system, which has a lot of research results, has a wide range of applications in research fields. Single-lens scanning system, multi-detector splicing system, multi-scale imaging system, and multi-lens splicing system in wide-field and high-resolution computational optical imaging systems at home and abroad are systematically described, and their advantages and disadvantages are analyzed and summarized. Finally, the future development of wide-field and high-resolution computational optical imaging systems has been prospected.

Key words imaging systems; computational imaging; optical system; wide field; high resolution

OCIS codes 110.1758; 080.3620; 110.2960

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(62075175, 62005203)、中央高校基本科研业务费专项(XJS190502, XJS200505, RW200145)

通信作者: *xpshao@xidian.edu.cn; **feiliu@xidian.edu.cn

1 引言

日常生活中人们在获取复杂繁多的目标信息时主要依赖视觉,光学系统的出现将远距离场景信息清晰地呈现在人们眼前,使得人类的视觉功能得到极大提升。传统成像中,光学系统不能同时满足广域和高分辨率的成像需求,因为对于单一光学系统而言,广域和高分辨率是相互制约的,若视场增大,则光学系统焦距减小,而在保持探测器像元大小不变的情况下,探测器像素密度减小,系统分辨率降低;与之相反,若分辨率增加,则需视场减小^[1]。比如鱼眼镜头,最大视场甚至可以达到 270° ,但是该镜头存在严重的畸变,且分辨率较低,不能清晰分辨场景目标的细节信息,成像性能较差^[2];而望远镜,可以实现远距离清晰成像,分辨率较高,但视场很小,最大视场不超过几度^[3]。随着光电成像技术的

不断发展,为了同时获得更大的视场范围和更加细节的目标信息,光学系统朝着广域和高分辨率的方向发展,广域高分辨率成像系统成为国内外光学领域学者们研究的热点问题。

计算成像技术的出现^[4]使得光学系统高性能成像成为可能,相较于传统成像,计算成像技术借助计算机高效的处理性能与光学系统相结合实现了广域高分辨率成像。目前已有多个计算光学成像系统得到广泛应用,包括无人机监控、遥感测绘、机器视觉、生物医疗以及智能监控等多个方面。

本文对计算光学成像系统中的单镜扫描系统、多探测器拼接系统、多尺度成像系统及多镜头拼接系统进行了综述,详述了它们的理论基础、成像原理、发展历程及优缺点,并对广域高分辨率计算光学成像系统的未来发展做了展望,图1对广域高分辨率计算光学成像系统进行了简单归类。

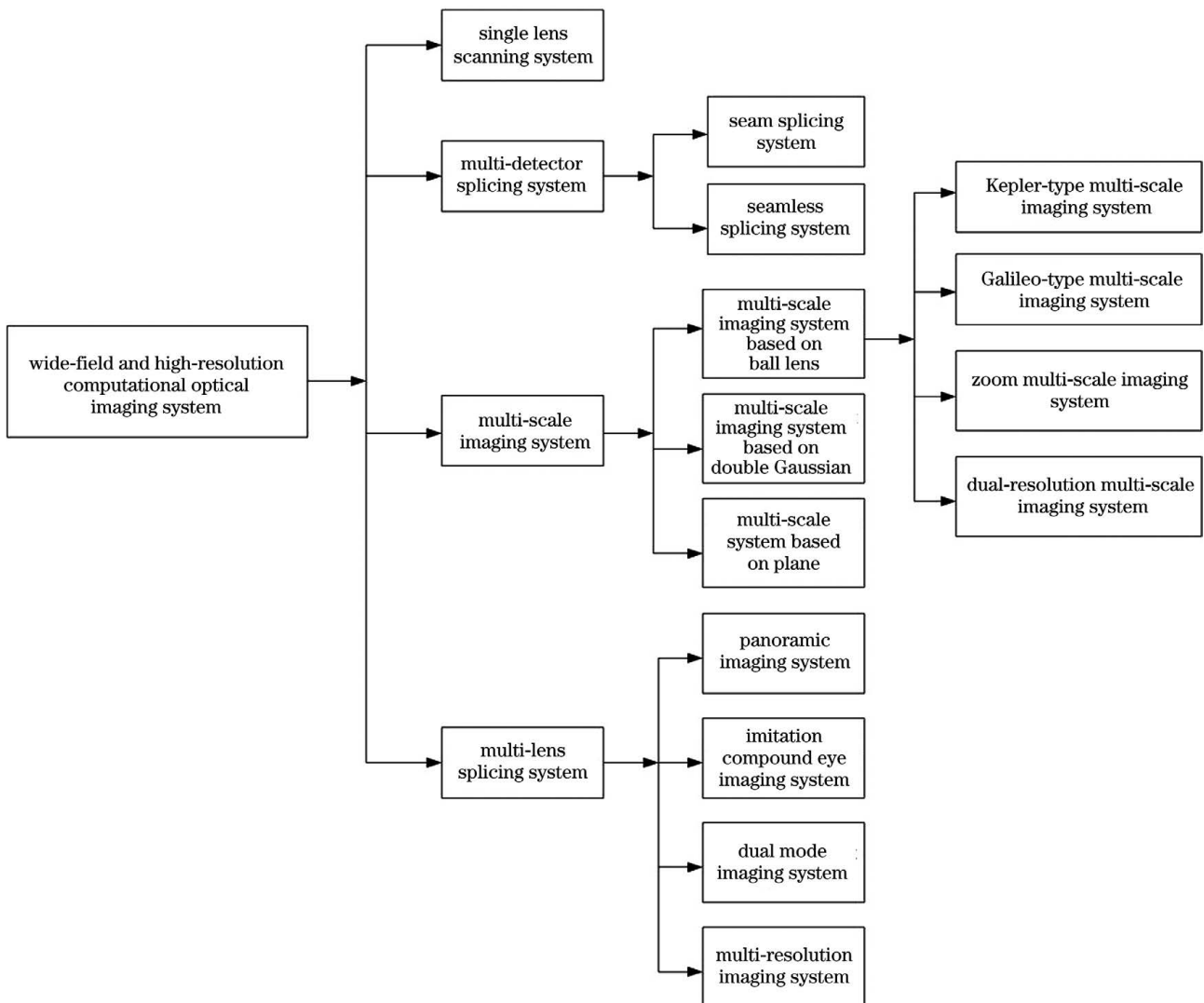


图1 广域高分辨率计算光学成像系统归类

Fig. 1 Classification of wide-field and high-resolution computational optical imaging systems

2 计算光学成像系统透镜比例法则

2.1 传统光学系统比例法则

Lohmann^[5]指出了传统光学系统性能评价指标对光学系统的缩放关系,从原理上说明了光学系统视场和分辨率之间的关系。当光学系统以 M 进行缩放时,光学系统 $F/\#$ 数(F)和视场角(FOV)不发生变化,系统焦距 f 、孔径直径 D 及像 $\Delta x \Delta y$ 缩放 M 。

当不考虑光学系统几何像差,即系统衍射受限时,可分辨的最小光斑尺寸仅由衍射决定,即 $\delta_d = \lambda F$ 。当光学系统缩放 M 时,衍射光斑大小保持不变,空间带宽积(SBP)为

$$R_d = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{(\lambda F)^2} \quad (1)$$

可见,SBP 随 M^2 增加而增加,如图 2 曲线 R_d 所示。

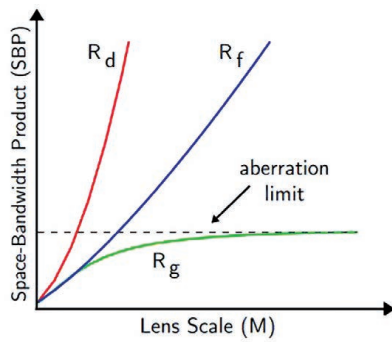


图 2 SBP 随 M 的变化曲线^[6]

Fig. 2 Graph of SBP changing with M ^[6]

实际成像中,几何像差则必须考虑。假设几何像差导致的弥散斑直径为 δ_g ,则 SBP 为

$$R_g = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{(\lambda F)^2 + M^2 \delta_g^2} \quad (2)$$

当 $M\delta_g \gg \lambda F$ 时,SBP 将达到一个稳定值,如图 2 曲线 R_g 所示。光学系统基本遵循随缩放因子的增加 SBP 增长速率趋于平缓的规律,同时也说明光学系统视场和分辨率相互制约的关系,且光学系统尺寸越大关系越明显。

2.2 计算光学成像系统比例法则

Cossairt 等^[6]将透镜比例法则拓展到计算成像技术领域。在计算成像技术中,光学系统的分辨率是由探测器像元大小 ξ 决定的。信噪比(SNR)是衡量图像质量的重要参数,在没有任何噪声的情况下,理论上可以通过减小探测器像元的大小来增加 SBP,直到达到衍射极限,但会使 SNR 急剧降低,极

大影响成像质量。

对于任一计算光学成像系统,探测器噪声 δN 、去模糊误差 δD ($1/\delta D$ 为 SNR)、缩放因子 M 三者之间的关系为

$$\delta D = \delta N \cdot M^{1/3.8} \quad (3)$$

探测器噪声与像元尺寸的关系为

$$\delta N = \frac{k}{\xi} \quad (4)$$

式中: k 是常数。因为计算光学成像系统 δD 固定,定义一个新的常数 k_1 ,且 $k_1 = \frac{k}{\delta D}$,则探测器像元大小与光学系统缩放因子的关系为

$$\xi = k_1 M^{1/3.8} \quad (5)$$

进而得出计算光学成像系统比例法则,即

$$R_c = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{\xi^2} = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{k_1^2 M^{(1/3.8)^2}} \quad (6)$$

与传统透镜比例法则相比,计算光学成像系统的 SBP 随缩放因子增大增加得更快,也就是说分辨率随 M 增大增加较快,如图 3 曲线 R_c 所示。同时表明,在相机尺寸较小的情况下,计算光学成像系统可以获得更大的分辨率。

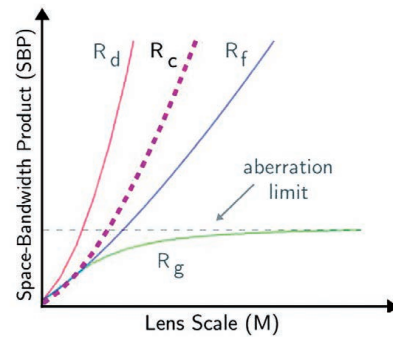


图 3 计算光学成像系统 SBP(R_c)随 M 变化曲线^[6]

Fig. 3 Graph of SBP(R_c) changing with M of computational imaging system^[6]

传统光学成像系统中由于像差的存在,SBP 随比例因子 M 的增大趋于一个稳定值,解释了视场和分辨率相互矛盾的原因;而计算光学系统的出现打破了固有的理论模式,使得大视场高分辨率成像成为可能,为光电成像系统的长远发展提供强有力的理论基础。

3 广域高分辨率计算光学成像系统

计算光学成像集光学、数学及信息于一体,突破传统工业化设计思维的局限,具备视场大、分辨率高、像素数多等优点。目前实现大视场超高像素成

像的方式主要有单镜扫描系统、多探测器拼接系统、多尺度成像系统及多镜头拼接系统。

3.1 单镜扫描系统

单镜扫描系统通常将单个高分辨率相机安装于云台上,通过控制云台改变高分辨率相机的成像区域,借助图像拼接技术对拍摄到的多幅图像进行拼接,从而获得大视场高清晰度图像。2007年,Kopf

等^[7]使用单个单反镜头进行扫描拼接成像,以获取广域高分辨率十亿级像素的图像,如图4所示。该系统使用焦距为100~400 mm的变焦镜头,长焦时以大约5 s的时间拍摄单张图像,30 min内采集高分辨率图像250张,90 min内采集图像800张,全视场角150°,图像总像素数36亿,拍摄耗时30~90 min,后期拼接处理需3~6 h。

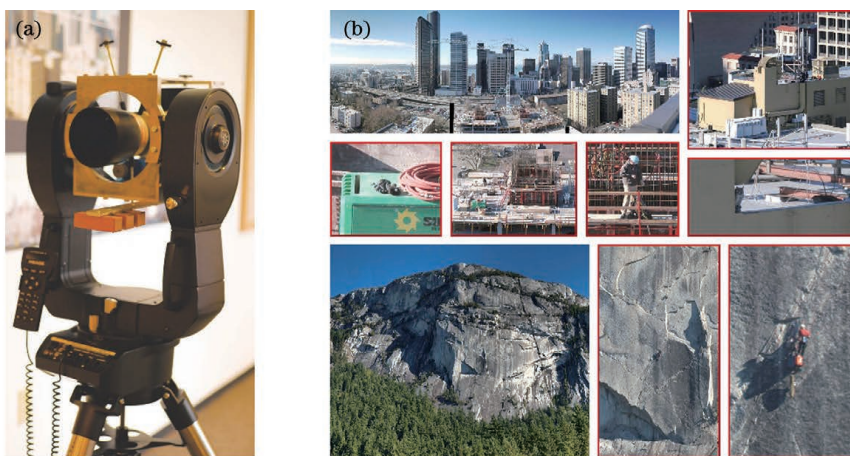


图4 单镜扫描成像系统^[7]。(a) Meade LX200 支架;(b) 成像效果

Fig. 4 Single-lens scanning imaging system^[7]. (a) Meade LX200 bracket; (b) imaging effect

2009年,David Bergman通过Gigapan相机记录了美国总统奥巴马在华盛顿国会大厦的就职演说,如图5所示^[8]。Gigapan相机拍摄了220张子图像,耗时15 min,后期经过图像拼接技术获得像素数高达14.74亿的整幅图像。次年,Gigapan公

司发布Gigapan Epic Pro相机,如图6所示^[9]。借助云台控制相机的拍摄方向,按顺序对网格状分割的视场进行扫描成像,通过后期的图像处理软件将拍摄的数百张子图像缝合成整幅广域高分辨率图像。

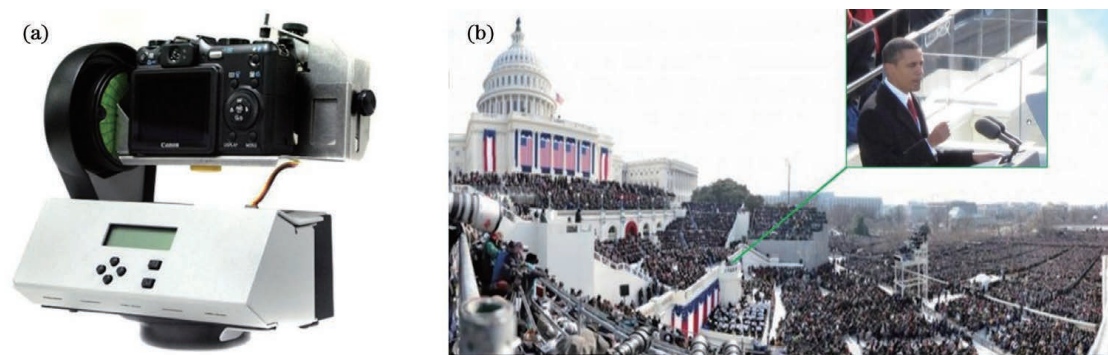


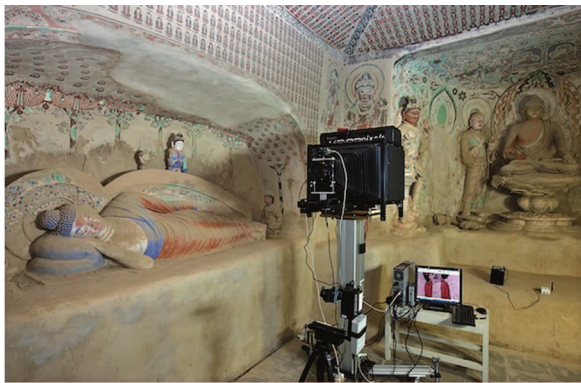
图5 Gigapan相机和奥巴马就职演说现场^[8]。(a) Gigapan相机;(b) 奥巴马就职演说现场

Fig. 5 Gigapan camera and Obama's inauguration speech scene^[8]. (a) Gigapan camera; (b) Obama's inauguration speech scene

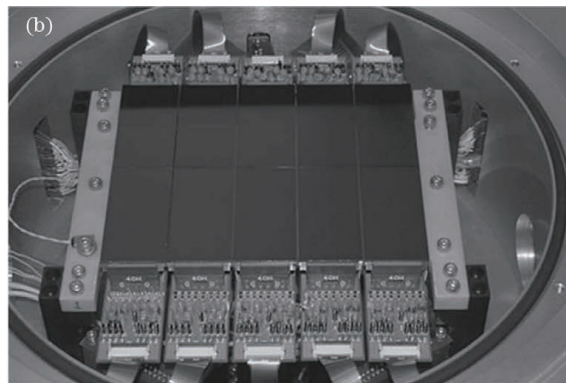
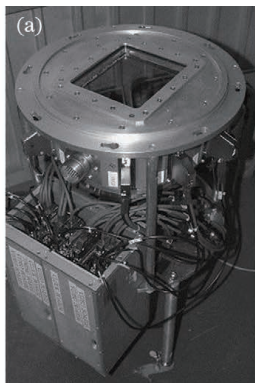
2011年,微软亚洲研究院研制出一款广域高分辨率成像系统,在我国敦煌莫高窟的工作图像如图7所示^[10]。该系统采用焦距为480 mm的施耐德APO-Symmar长焦镜头,探测器像元大小为9 μm、像素数为1100万的柯达KAI-11002,曝光时间为0.1~1 s,完成整幅图像的拍摄用时为5~8 min,视场角56°,全视场图像像素数达10.42亿,

可自动捕获具有一定重叠率的子图像,后期配备独特的图像校正和图像拼接算法。

综上所述,单镜扫描拼接系统通过单个高分辨率镜头就可获得广域高分辨率图像,技术难度较低、成像系统结构简单且容易商用化,适用于安防监控、古迹保护、地址研究等领域。但使用单镜头旋转拍摄耗时较长,后期图像拼接也有一定的时间延迟,使

图6 Gigapan Epic Pro 相机^[9]Fig. 6 Gigapan Epic Pro camera^[9]图7 微软广域高分辨率成像系统^[10]Fig. 7 Microsoft's wide-field and high-resolution imaging system^[10]

得该技术的应用范围受到限制。总的来说,该成像

图8 MOA-cam3 相机和 MOA-cam3 的 10 片 CCD 阵列^[12]。(a)MOA-cam3 相机;(b)MOA-cam3 的 10 片 CCD 阵列Fig. 8 MOA-cam3 and ten CCD arrays of MOA-cam3^[12]。(a)MOA-cam3 camera;(b)ten CCD arrays of MOA-cam3

UltraCam-D(UCD)^[17] 是澳大利亚 Vexcel 公司 2003 年推出的面阵航空相机,由 8 个独立的相机构成,包含 4 台黑白影像的全色相机和 4 台多光谱相机。其中 4 台多光谱相机分别对应红、绿、蓝和红外波段,焦距仅 28 mm,可覆盖全色相机的视场;用于获取黑白影像的全色相机采用了多探测器拼接的方式。图 10 为在全色波段的拼接方案,4 个全色相

方式仅适用于静态或准静态场景下的广域高分辨率成像,不适用于动态场景或高帧频的视频成像。

3.2 多探测器拼接系统

多探测器拼接系统通过对光学系统内部像面进行分光,光投射于各个探测器感光面上,最终借助数字图像处理算法获得拼接后的整幅图像,实现广域成像。根据拼接效果,可分为有缝拼接和无缝拼接。

3.2.1 有缝拼接系统

Microlensing Observations in Astrophysics (MOA)项目^[11]始于 1999 年,MOA-cam3 是 MOA 项目中的第三代成像组件,样机和探测器阵列如图 8 所示^[12]。MOA-cam3 相机在 400~950 nm 波段内透过率超过 95%,采用 10 片 CCD4482 芯片(E2V 公司)且按 5×2 阵列排布,单个探测器的像元尺寸大小为 15 μm,像素数为 2000×4000,该 CCD 相机经过特殊封装,将引脚设计在一侧,其他 3 个侧面可进行拼接,相邻 CCD 光敏面间的缝隙较小,安装精度可达 25 μm。

大型综合巡天望远镜(LSST)^[13-16]是一个大型地基天文望远镜,焦平面阵列示意图如图 9 所示^[13],每个小正方形里的方块代表一个像素数为 4096×4096、像元大小为 10 μm×10 μm 的 CCD 探测器,每 9 个 CCD 探测器按 3×3 阵列组成一个模块,整个焦平面阵列由 21 个模块构成,共包含 189 个探测器,系统总像素数达 32 亿。

机并行排布,焦平面上分别放置 4,2,2,1 块探测器进行图像采集,实现了 3×3 阵列成像,与传统探测器拼接方式相比,将相邻探测器安装在不同相机下的方式有效避免了探测器引脚相互干涉的问题。

Kepler 望远镜^[18-19]是一个美国国家航空航天局(NASA)设计用来发现环绕类太阳恒星的成像系统。该望远镜的光学系统主要由球面主镜、施密特

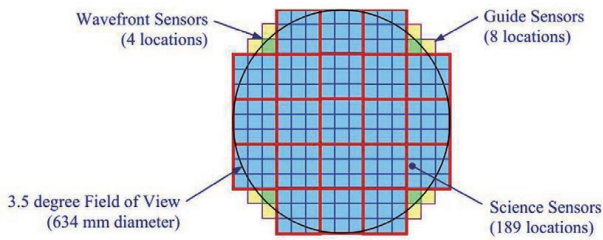


图9 LSST 焦平面阵列^[13]

Fig. 9 Focal plane array of LSST^[13]

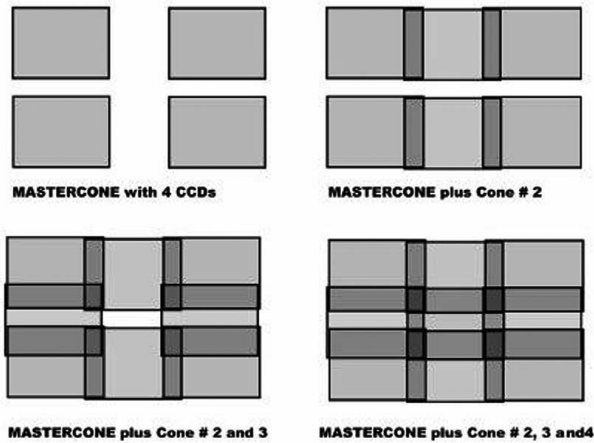


图10 UCD相机探测器拼接方案^[17]

Fig. 10 Detector splicing scheme of UCD camera^[17]

校正镜和焦平面阵列组件(FPAA)构成,其中FPAA由21个模块共42个CCD探测器组成,如图11(a)所示^[18]。值得注意的是焦平面阵列是凸起的,可减小施密特光学系统的场曲,提高光学系统性能;每个模块都有2个CCD探测器,如图11(b)所示^[18],每个探测器的像元尺寸为 $27\ \mu\text{m}\times 27\ \mu\text{m}$,像素数为 1024×2200 。整体系统的视场可达 $115^\circ\times$

115° ,总像素数达0.95亿,可探测9~16等的星等。

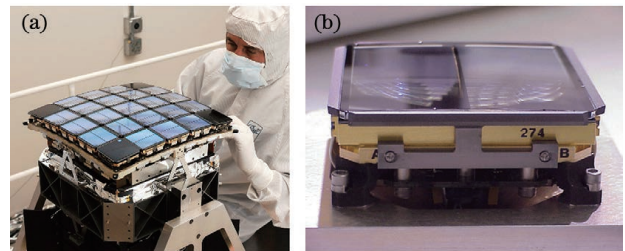


图11 Kepler望远镜单个探测器模块和完整的焦平面阵列组件^[18]。(a)完整的焦平面阵列组件;(b)单个探测器模块

Fig. 11 Single detector module and complete focal plane array assembly of Kepler telescope^[18].

(a) Complete focal plane array assembly; (b) single detector module

3.2.2 无缝拼接系统

自主实时地面广域侦察成像系统(ARGUS-IS)是美国国防部先进项目研究局(DARPA)和BAE系统公司联合研制的一款具有18亿像素的机载吊舱,可实现广域高分辨率对地观测,如图12所示^[20]。ARGUS-IS由368个500万像素的数字成像芯片组成,安装在4个独立的相机里,4个镜头分别对应一个焦平面阵列。每个焦平面阵列由92个CMOS探测器组成,92个CMOS呈棋盘状分布,4个焦平面阵列相互交错。通过图像拼接技术将子图像拼接为无缝隙的全幅图像,成像清晰度足以保证从6500 m的高空识别并追踪车辆和步行者,地面分辨率为0.15 m,瞬时视场角达到 $23\ \mu\text{rad}$,能同时追踪至少65个目标。

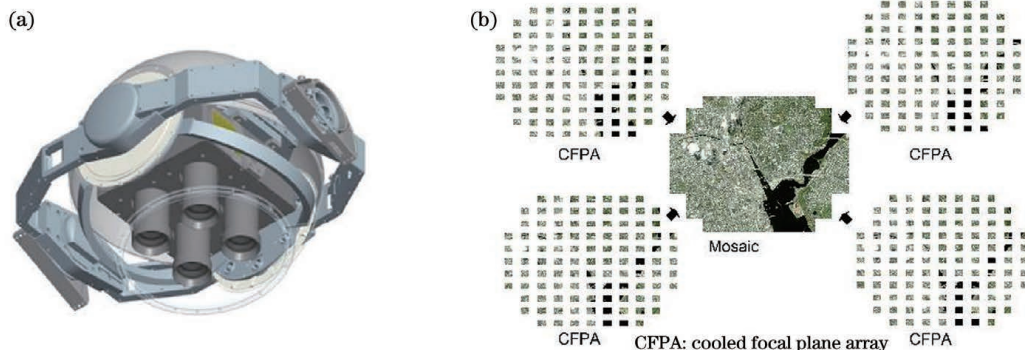


图12 ARGUS-IS成像系统和全视场图像^[20]。(a)ARGUS-IS成像系统;(b)全视场图像

Fig. 12 ARGUS-IS imaging system and full field of view image^[20]. (a) ARGUS-IS imaging system; (b) full field of view image

综上所述,多探测器拼接系统原理简单,易实现广域高分辨率成像,且适用于航空侦察、天文观测等领域,但该技术存在探测器拼接漏缝现象,会造成图

像质量下降。李富强等^[21]对多探测器拼接镜片参数进行了公式推导,有望解决多探测器拼接引起的漏缝和杂光问题。但是截止目前仅ARGUS-IS系

统可实现无缝拼接。此外,光学系统体积庞大、成本昂贵的问题也影响该技术的实际应用。

3.3 多尺度成像系统

多尺度成像系统是通过大尺度主光学系统收集光能,多级小尺度光学系统进行转接成像,对大尺度主光学系统和多个小尺度光学系统进行级联并结合图像拼接技术实现广域高分辨率成像的一种方式。目前比较成熟的多尺度成像系统大多只包含两级,主要包括主光学系统、次级相机阵列、探测器阵列及信号处理单元等,原理如图13所示。该成像方式于2009年由杜克大学的Brady等^[22]基于计算成像理论提出,并做了大量工作^[22-30]。根据成像系统主物镜是否采用球透镜,可将多尺度成像系统大致分为

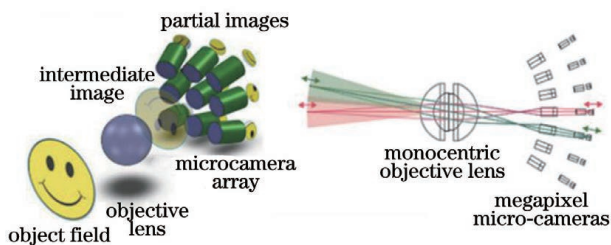


图13 多尺度成像原理

Fig. 13 Principle of multi-scale imaging

两大类,基于球透镜的多尺度成像系统和其他多尺度成像系统。而根据次级系统的不同结构,可将基于球透镜的多尺度成像系统分为开普勒型、伽利略型、变焦多尺度成像系统、双分辨率多尺度成像系统。

3.3.1 基于球透镜的多尺度成像系统

3.3.1.1 开普勒型多尺度成像系统

采用球透镜的主光学系统和次级光学系统构成开普勒型多尺度成像系统可有效减小 F 数,提高系统分辨率,同时可解决传统凝视成像系统中系统畸变大、光能利用率低及视场盲区等问题,具备多项优势的开普勒型结构受到国内外多位学者的极大关注。

2011年,美国哥伦比亚大学设计出一款多尺度十亿像素原理样机,样机和成像效果如图14所示^[6]。该系统使用球透镜作为主成像系统,5个小相机阵列构成次级成像系统,配合后期计算成像方法减小系统像差,实现 $15^\circ \times 2^\circ$ 视场、十亿像素成像。该方法需要借助计算机后期处理校正像差,不属于光学设计范畴,故该系统并不是真正意义上的计算光学成像系统。

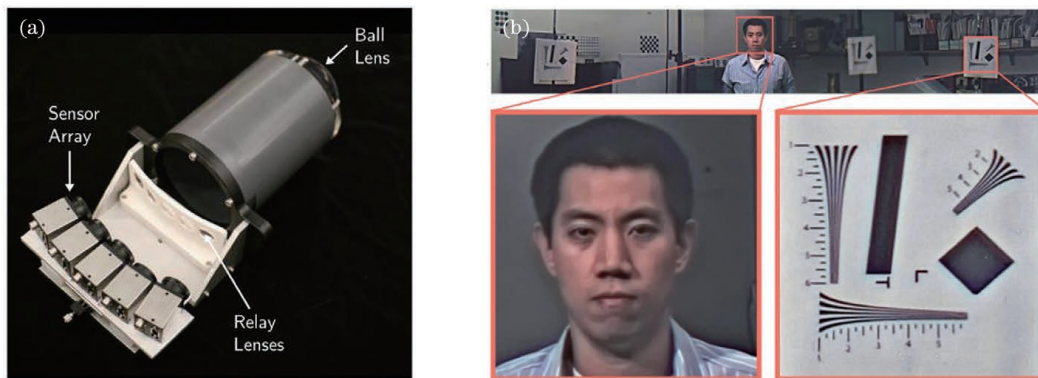


图14 十亿像素相机和成像效果^[6]。(a)相机;(b)成像效果

Fig. 14 Gigapixel camera and imaging effect^[6]. (a) Camera; (b) imaging effect

最具代表性的开普勒型多尺度成像系统则是Brady等研制的Advanced Wide-field-of-view Architecture for image Reconstruction and Exploitation(AWARE)系列。美国国防部先进研究项目局(DARPA)规划部署的AWARE项目旨在建立一种多微型相机平台,以满足增大视场、提高分辨率、提高目标识别的成像能力需求。杜克大学Brady团队在DARPA的支持下,研制出一款名为AWARE-2的10亿超高像素相机^[31-35]。主成像系统为一6cm球形镜头,周围环绕98个小相机构成的阵列,单个小相机采用 1.4×10^7 像素的成像器

件,如图15所示^[31]。系统总焦距为34.2mm,视场角为 $120^\circ \times 50^\circ$,拍摄一张照片用时仅18s,解析度是人眼的5倍,可以清晰地放大800m以外的图像。2013年设计的AWARE-10^[36-37]与AWARE-2成像原理相同,是AWARE-2系统的增强版,样机及成像效果如图16所示^[37]。该系统的总焦距为53.21mm, F 数为3.2,视场为 $100^\circ \times 60^\circ$,总像素可达20亿,对海上4~6km内10m尺寸的目标具有70%的可辨别精度。

北京空间机电研究所戚均恺等^[38]针对国内外实现广域高分辨率的主要技术途径,设计出一种多

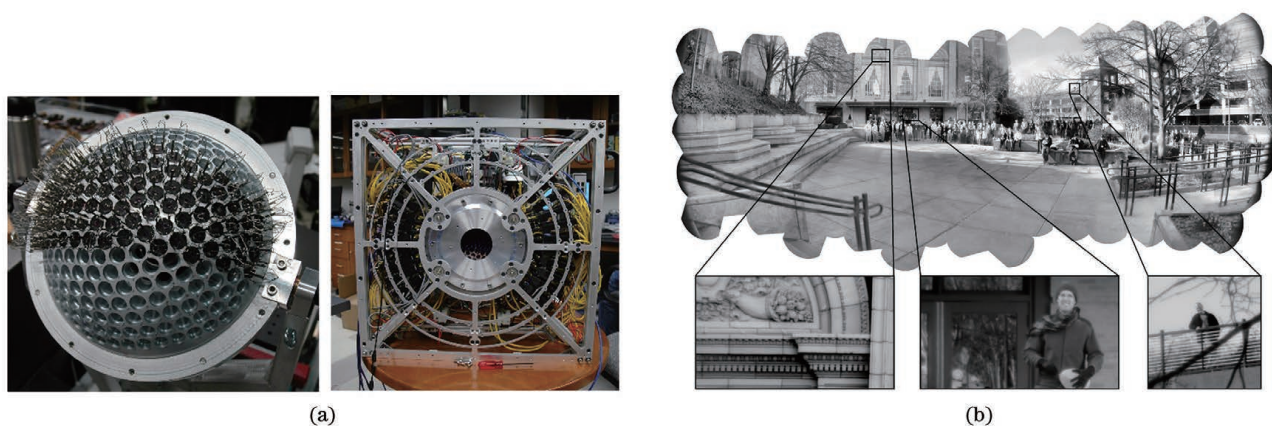


图 15 AWARE-2 成像系统及成像效果^[31]。(a)AWARE-2 成像系统;(b)成像效果

Fig. 15 AWARE-2 imaging system and imaging effect^[31]. (a) AWARE-2 imaging system; (b) imaging effect

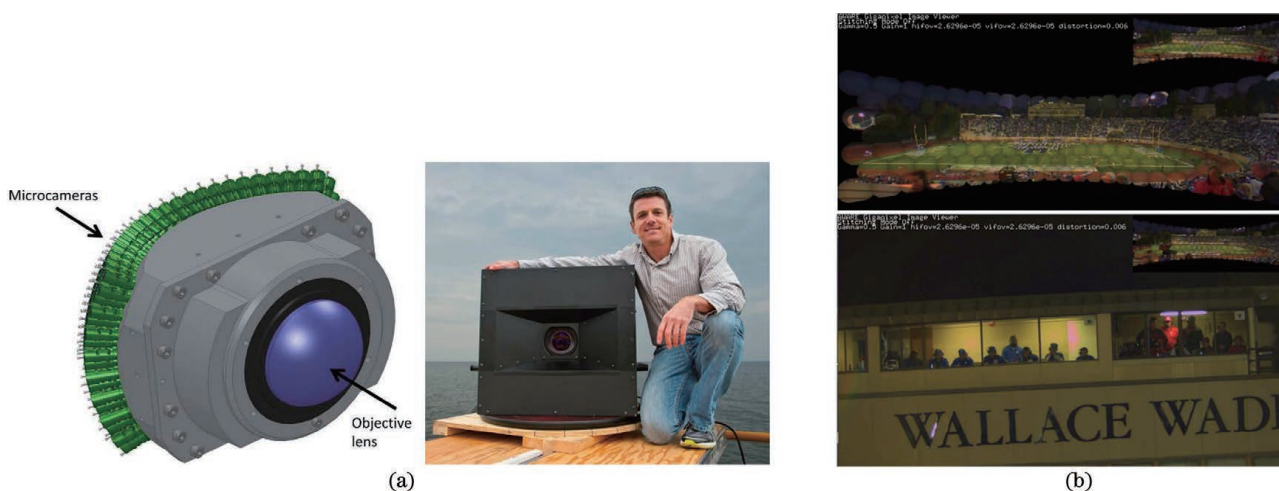


图 16 AWARE-10 成像系统及成像效果图^[37]。(a)AWARE-10 成像系统;(b)成像效果

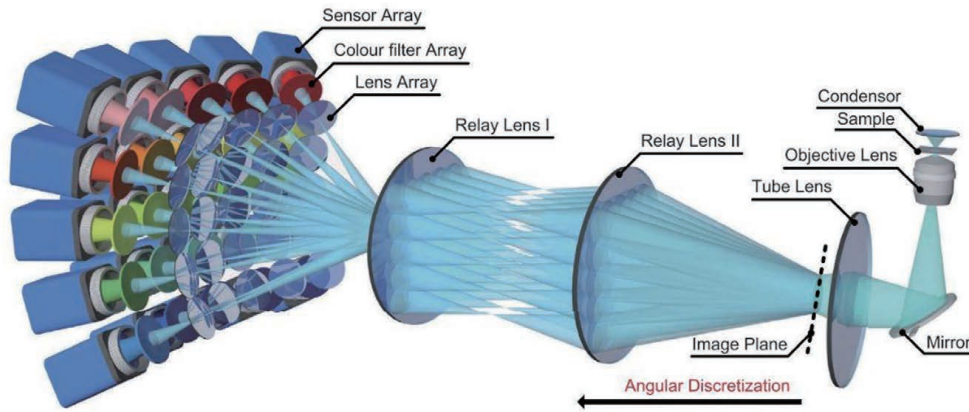
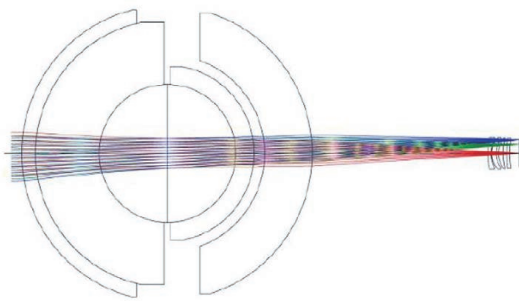
Fig. 16 AWARE-10 imaging system and imaging effect^[37]. (a) AWARE-10 imaging system; (b) imaging effect

尺度单心光学系统,该系统具有畸变小、照度均匀、无需扫描即可获得广域高分辨率图像的优势。2014年,庄绪霞等^[39]研究了多尺度广域十亿像素成像技术,深入分析了该技术的工作原理、设计指标、关键技术及应用前景,为后续光学系统的设计提供强有力的参考。2015年,浙江大学冯彦超^[40]对基于计算成像的广域高分辨率相机进行了仿真与图像校正,利用单球透镜设计了3组基于计算成像的广域高分辨率相机,多镜头阵列分别为 3×4 、 4×4 和 5×5 ,后期通过图像处理的方式校正了光学系统的残余像差,提高了成像质量。但3组相机的光学系统相对而言并不完善,更多地通过后期图像处理技术来改善成像质量,使得图像处理要求较高。次年,吴懿思^[41]基于多尺度成像理论对6个子孔径进行拼接,实现宽视场高分辨率成像。光学系统主物镜采用双胶合设计,次级微透镜由2个单透镜组成,系统等效焦距为135 mm, F数为3.6,探测器像元尺

寸为 $4.5 \mu\text{m}$ 。成像系统视场接近 60° ,分辨率达 $10 \text{ cm}@3 \text{ km}$,总像素数超1亿。但由于该样机通过拼接横向视场的子视场获取最终图像,纵向视场仅是单个子视场,当系统探测、搜索目标时,纵向视场受限,影响目标信息的检测和识别。

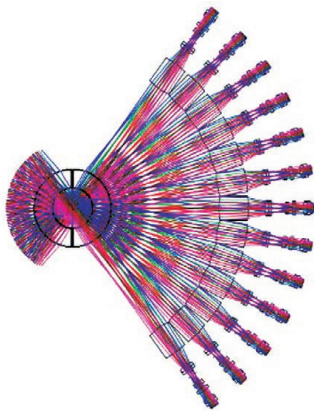
2016年,清华大学Wu等^[42]研制了基于多尺度设计方案的广域成像系统,成像原理如图17所示。该系统全面考虑计算光照、计算光场、计算传感及计算重建过程,采用4D去卷积算法获得广域高清晰度图像,主要应用于生物医学领域。

同年,哈尔滨工业大学陈婷^[43]设计了共心球面多尺度成像系统,设计结果如图18所示。2018年,该校薛露^[44]将多尺度成像系统设计工作拓展到红外波段,设计 3×3 和 5×5 微相机阵列的红外成像系统,成像模式和陈婷的共心球面多尺度成像系统基本类似,9个微相机阵列的系统以方形排布,实现 $32^\circ \times 32^\circ$ 成像,25个微相机阵列的系统以正三角形

图 17 成像系统原理图^[42]Fig. 17 Schematic of imaging system^[42]图 18 共心球面多尺度成像系统^[43]Fig. 18 Concentric sphere multi-scale imaging system^[43]

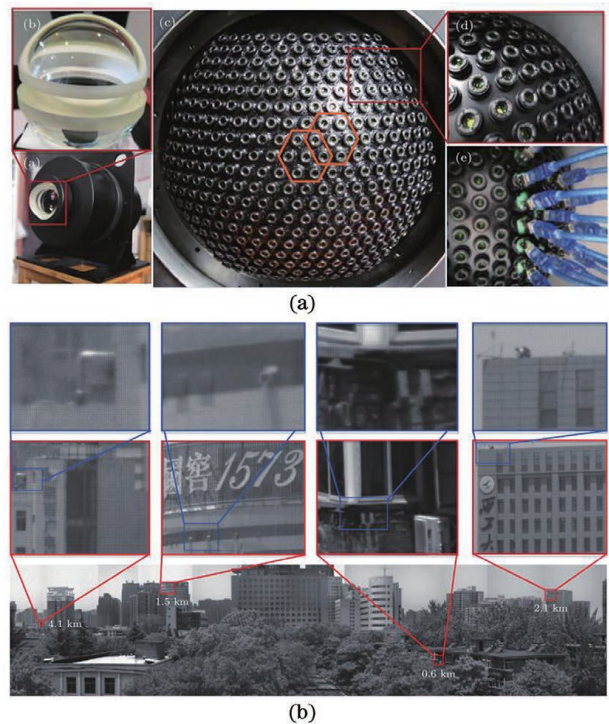
方式排布,实现 $52^\circ \times 52^\circ$ 的广域成像。

2017年,徐奉刚^[45]设计了一款10亿像素的同心多尺度系统,如图19所示,该系统有效焦距为35 mm,系统总长为278.05 mm,通过对基于正二十面体测地线的微移动法进行优化,设计了微相机的合理排布方式,采用104个微相机实现 $120^\circ \times 60^\circ$ 广域成像,具有同心多尺度系统成像质量优质、结构紧凑的优点。

图 19 十亿像素的同心多尺度系统^[45]Fig. 19 Gigapixel concentric multi-scale system^[45]

西安电子科技大学在多尺度成像方面做了大量

工作。其中,邵晓鹏团队于2014年对计算成像提升图像质量的原理进行了分析,分别给出了基于4层球面和6层球面的共心多尺度光学系统设计实例,为宽视场高分辨率成像系统的工程化应用奠定了良好的基础^[46]。2019年,刘飞等^[47]研制出一台基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算光学成像系统样机,如图20所示。直径为113.8 mm的四胶合球透镜作为主成像系统,次级成像系统由长度为62 mm的6组9片双高斯结构构成,系统总长为

图 20 多尺度计算光学成像系统及成像效果图^[47]。

(a) 成像系统; (b) 成像效果

Fig. 20 Multi-scale computational imaging system and its imaging effect^[47]. (a) Imaging system;

(b) imaging effect

295 mm,像方F数为3.3,焦距为47 mm,单路小相机全视场为 8° ;399个小相机按六边形排布方式放置于主成像系统的一次像面处,结合后期图像拼接技术获取广域高分辨率图像,成像视场为 $120^\circ \times 90^\circ$,分辨率为 $5 \text{ cm}@5 \text{ km}$,总像素数高达32亿;该成像系统有效实现了共心多尺度系统的工程化应用,可对 $0\sim 5 \text{ km}$ 内的目标实现高清晰度、无畸变成像,实时成像效果良好,系统适应性强。

王晓蕊团队对多尺度成像系统也做了相应的研

究。2017年,该团队研制出一种具有 2×3 稀疏阵列的共心多尺度成像系统,如图21所示^[48]。单球透镜作为主透镜,两片凸透镜构成次级相机,与其他系统设计不同的是,主物镜和次级光学系统中都存在光阑,以限制光束。该系统探测器像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$,6幅子图像的采集仅需 $1/5 \text{ s}$,相邻相机之间的视场重叠率保持在15%左右,单个小相机视场为 $32^\circ \times 32^\circ$,总视场约为 $60^\circ \times 90^\circ$,瞬时视场为 $270 \mu\text{rad}$,总像素数达2000万。

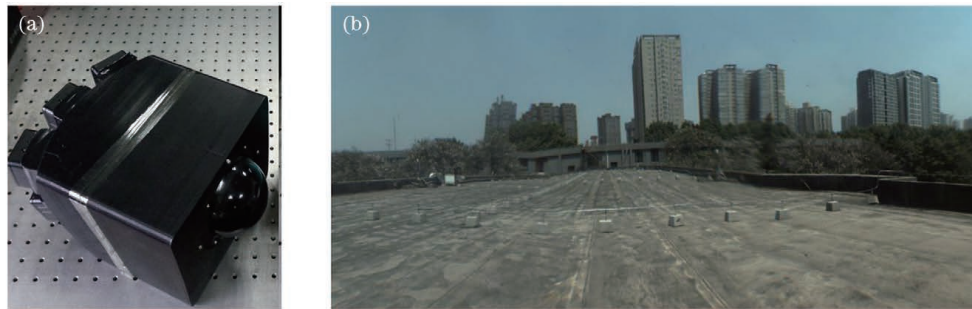


图21 系统原理样机与6个子视场图像拼接效果图^[48]。(a)样机;(b)图像拼接效果图

Fig. 21 Principle prototype and 6 sub-field image stitching rendering^[48]. (a) Prototype; (b) image stitching rendering

2019年,国防科技大学路文文等^[49]基于多尺度成像理论设计出一种混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统。主光学系统为仿生鱼眼的物镜,次级光学系统为仿生复眼的小型目镜,两级系统结合实

现接近衍射极限的高清成像。2021年,该团队研制出一台原理样机,如图22、23所示^[50]。光学系统有效焦距为49.7411 mm,总长为271 mm,探测器像元大小为 $1.67 \mu\text{m}$,全视场大于 $\pm 50^\circ$ 。

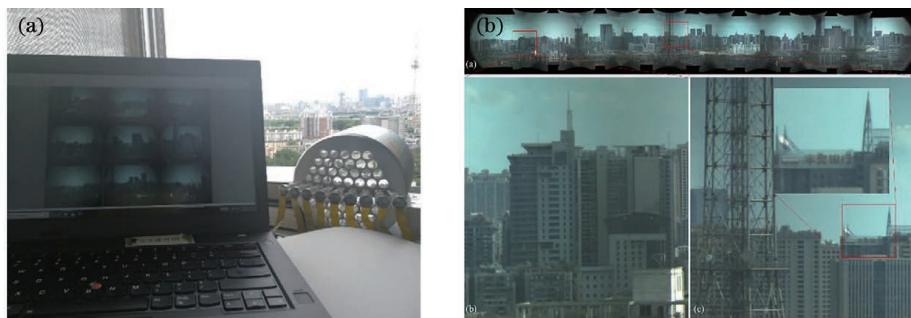


图22 9×1 子孔径样机及7.4 km处拍摄效果^[50]。(a)样机;(b)拍摄效果

Fig. 22 9×1 sub-aperture prototype and imaging effect at 7.4 km^[50]. (a) Prototype; (b) imaging effect

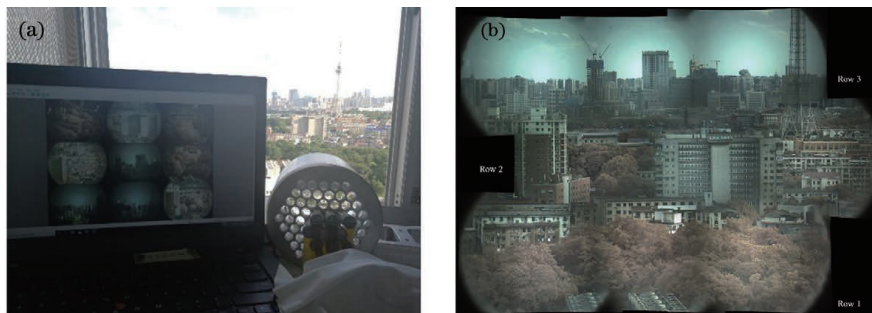


图23 3×3 子孔径样机及7.4 km处拍摄效果^[50]。(a)样机;(b)拍摄效果

Fig. 23 3×3 sub-aperture prototype and imaging effect at 7.4 km^[50]. (a) Prototype; (b) imaging effect

2021年,苏州大学李加慧等^[51]针对机载相机航拍作业的需求,设计了适用于不同飞行高度的新型级联式光学成像系统。该机载相机单路光学系统焦距为60 mm, F数为3.4, 视场为 5.92° , 采用29个成像通道实现 132° 大范围视场成像, 相邻通道视场重叠率大于等于13%, 通过在100, 1000, 8000 m飞行高度处对光学系统成像质量进行分析, 验证了机载光学系统成像质量一致性好的特点, 在不同飞行高度处均可高清晰度成像。同年, 李加慧等^[52]对新型级联式光学成像系统进行了改进, 单路光学系统的参数均与新型级联式光学成像系统一致, 不同的是在次级光学系统中引入了非球面平衡轴外像差, 减少了镜片数量, 缩短了光学筒长, 成像性能优越; 此外, 该系统设计飞行高度为20~80 m, 可有效实现超低空农情探测和监视。

2021年, 西安电子科技大学李江勇等^[53]针对机载光电成像系统设计了一种基于共心球透镜的机载多尺度广域高分辨率成像系统, 并对系统结构进行了稳定性分析。实验结果表明, 共心多尺度广域成像系统的稳定性和成像效果良好, 但目前该系统仅处于设计阶段, 并未真正搭载于飞行系统使用。

3.3.1.2 伽利略型多尺度成像系统

开普勒型多尺度成像系统凭借良好的成像性能在众多领域实现了广泛应用, 但两次成像方式导致系统结构长、体积大, 且次级系统视场小、数量多, 并不能满足目前成像系统小型化的需求; 而采用球透镜的主光学系统和次级光学系统构成的伽利略型多尺度成像系统无一次像面, 子系统视场大、数量少, 凭借系统简单、集成度高的优势受到研究学者的关注。

中国科学院西安光学精密机械研究所沈阳等^[54-55]研制出一种分布式多焦距多尺度成像系统, 如图24所示。该系统不同视场对应不同焦距的补偿透镜组, 主物镜采用5片胶合的同心球透镜, 3组补偿透镜组均采用伽利略型结构, 中心通道焦距为49.75 mm, 中间通道焦距为54.42 mm, 边缘通道焦距为65.48 mm, 越靠近边缘视场, 系统焦距越大, 易获得和中心通道相近的分辨率; 所有子系统F数均为7, 可保证全视场范围内相对照度一致。为验证该系统成像性能, 仅加工一组次级系统, 通过精密转台带动次级成像系统绕球透镜扫描成像, 实现 110° 广域成像, 成像效果如图25所示^[54]。

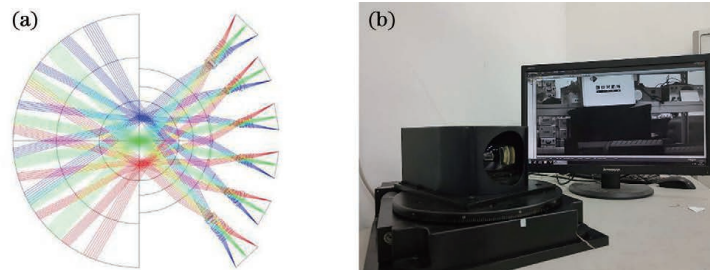


图24 分布式多焦距多尺度成像系统结构图及实物图^[55]。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 24 Diagram of distributed multi-focus multi-scale imaging system structure and physical diagram^[55].

(a) Structure diagram; (b) physical diagram

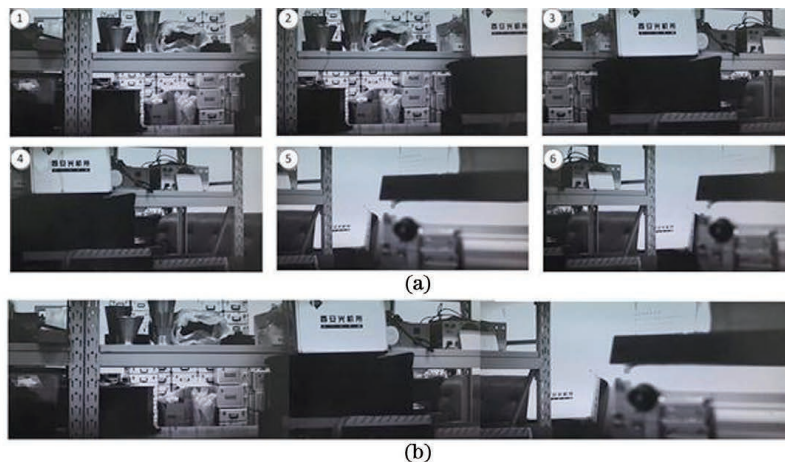
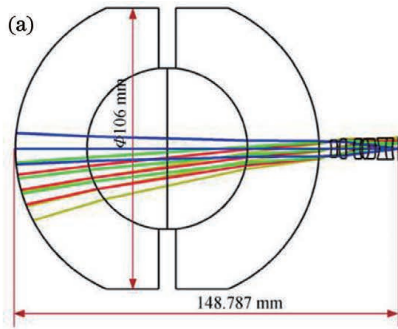


图25 样机成像效果^[54]。(a)单幅图像;(b)拼接图像

Fig. 25 Prototype imaging effect^[54]. (a) Single image; (b) stitched image

2020年,西安电子科技大学刘飞等^[56]针对多尺度计算光学成像系统样机尺寸大、质量大等问题,对多尺度成像系统进行了高集成度小型化设计,如图26所示,并研制一枚导引头,如图27所示。该光学系统采用伽利略型多尺度成像结构,既发挥了球透镜全视场成像一致性好的优点,又



利用了伽利略结构体积紧凑的特点,等效焦距为40 mm,探测器像元尺寸为 $1.85 \mu\text{m}$,F数为3.3,采用61个微相机阵列,成像视场达 $90.57^\circ \times 67.94^\circ$,在实现广域高分辨率成像的前提下降低了系统的体积和复杂度,提高了系统的空间利用率,达到了轻量化的目的。

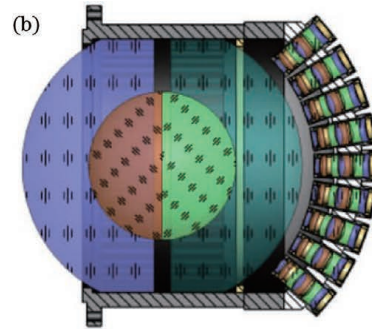


图26 共心多尺度光学系统结构图与成像原理图^[56]。(a)结构图;(b)原理图

Fig. 26 Diagram of concentric multi-scale optical system structure and imaging principle diagram^[56]. (a) Structure diagram; (b) principle diagram

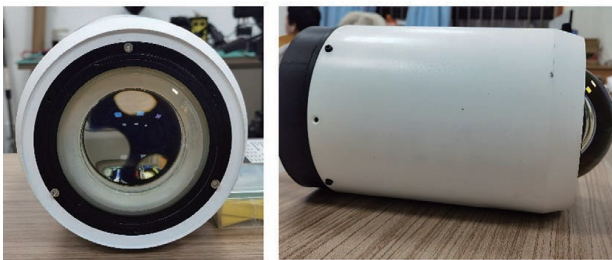


图27 高集成度导引头

Fig. 27 Highly integrated seeker

3.3.1.3 变焦多尺度成像系统

目前大多数的多尺度成像系统为定焦模式,2019年西安电子科技大学杨威等^[57]将多尺度成像工作波段拓展到红外波段,设计了基于共心球透镜的广域红外变焦系统,如图28所示。该系统前端仍然以共心球透镜为主成像系统,后端采用具有变焦功能的微相机阵列作为次级成像系统,小相机采用全动变焦方式以实现视场连续切换,在进行目标搜索和跟踪时可保证像面稳定与目标的不丢失,有效实现广域目标捕获和小视场高精度目标识别的目的。该系统工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,变倍比为 $2\times$,变焦范围为 $68 \sim 136 \text{ mm}$,探测器像元大小为 $17 \mu\text{m}$,使用24个变焦小相机构成次级成像系统,长焦时单路小相机全视场 11.8° ,短焦时单路小相机全视场 5.9° ,系统处于长焦模式时空间分辨率可达 0.179 mrad ,处于短焦模式时空间分辨率达 0.36 mrad ,可对距离20 km处 $4 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的坦克目标进行探测。

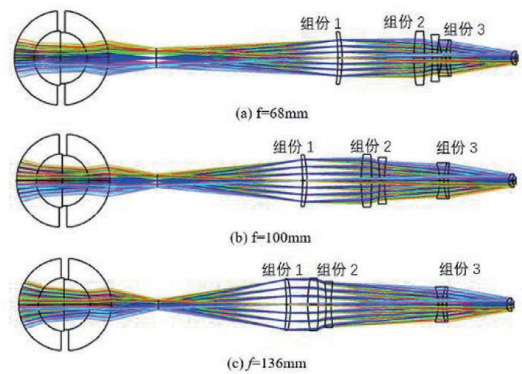


图28 红外变焦光学系统结构示意图^[57]。

(a) $f=68 \text{ mm}$; (b) $f=100 \text{ mm}$; (c) $f=136 \text{ mm}$

Fig. 28 Schematic of infrared zoom optical system^[57].

(a) $f=68 \text{ mm}$; (b) $f=100 \text{ mm}$; (c) $f=136 \text{ mm}$

3.3.1.4 双分辨率多尺度成像系统

2016年,西安电子科技大学吴雄雄等^[58]提出一种同心多尺度双分辨率成像系统,原理如图29所示。前级系统采用一个同心球形物镜,次级系统采

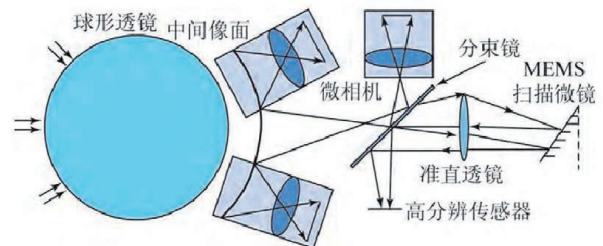


图29 同心多尺度双分辨率成像系统原理示意图^[58]

Fig. 29 Principle of concentric multi-scale dual-resolution imaging system^[58]

用1个单透镜和1个双胶合透镜,结合二轴微机电系统(MEMS)扫描显微镜,通过驱动MEMS子成像系统可实现小视场下的高分辨率扫描成像,动态跟踪目标区域。2018年,该团队^[59]基于2016年 3×3 的阵列方案研制出一台原理样机,如图30所示,不同的是样机前级系统采用的是四胶合球透镜,次级系统的结构更为复杂。原理样机光学系统总长为

450 mm,等效焦距为17 mm,探测器像元大小为 $2.2\ \mu\text{m}$,单个子孔径视场为 $\pm 12^\circ$,总视场达 70° ,角分辨率为 $2.0\times 10^{-4}\ \text{rad}$ 。该系统虽然使用较少的次级小相机实现了中继成像,减少了图像获取、传输和处理的数据量,但多个微相机分割视场转接成像会造成系统中心遮拦大的问题,同时也存在定焦系统无法实现对探测区域内目标信息的细节进行放大的问题。

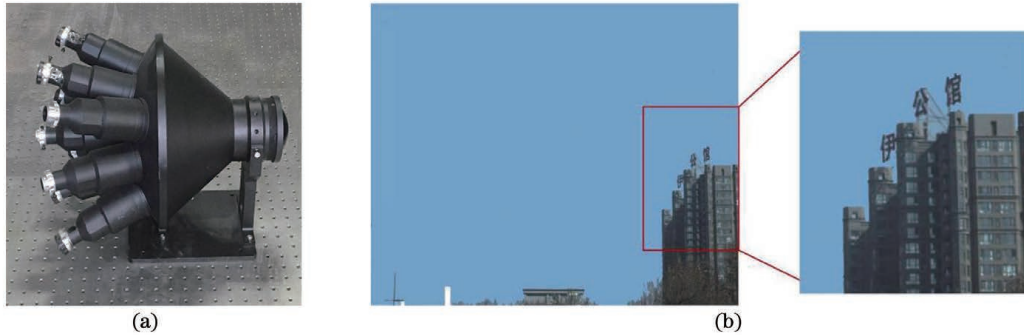


图30 原理样机及成像效果^[59]。(a)样机;(b)成像效果

Fig. 30 Principle prototype and imaging effect^[59]. (a) Prototype; (b) imaging effect

3.3.2 基于类双高斯的多尺度成像系统

2014年,Brady团队^[60-61]研制了基于类双高斯的AWARE-40成像系统,该系统是一种主光学系

统采用类双高斯透镜的多尺度成像系统,如图31所示。系统焦距为130 mm左右,视场角为 36° ,可实现36亿像素成像。AWARE-40不同于AWARE-2

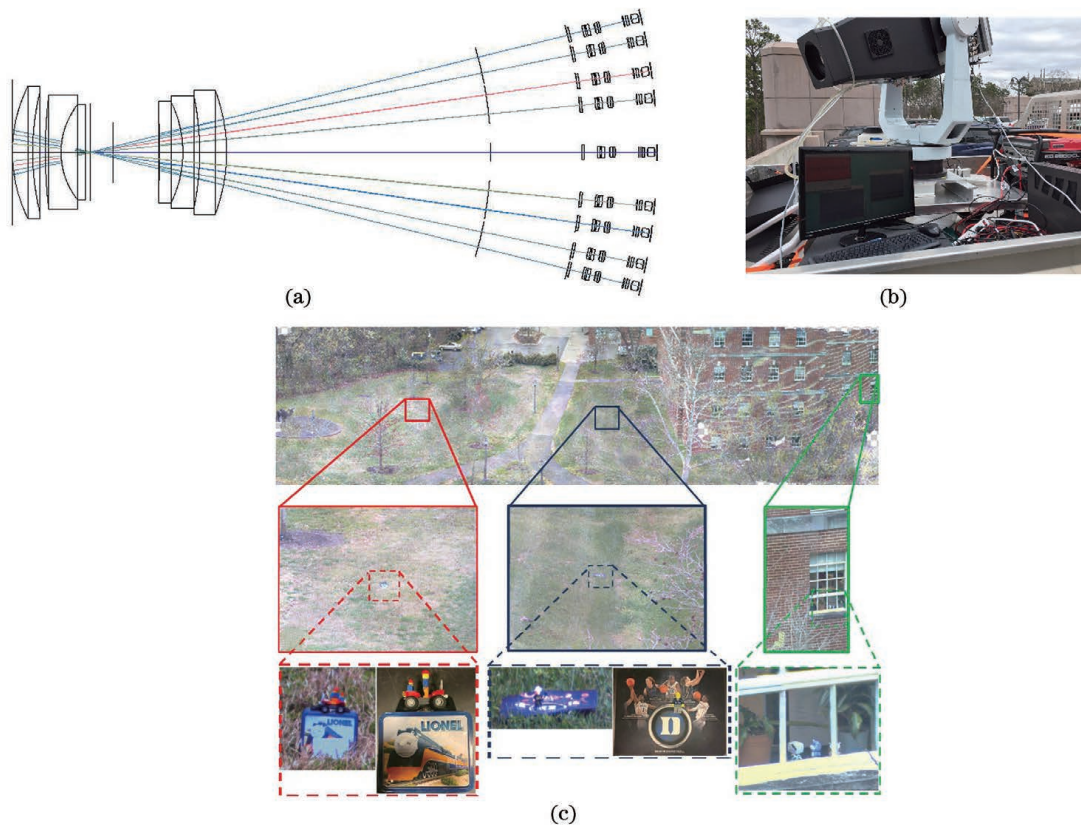


图31 AWARE-40的光学结构、成像系统及成像效果^[61]。(a)光学结构;(b)成像系统;(c)成像效果

Fig. 31 Optical layout, imaging system, and imaging effect of AWARE-40^[61]. (a) Optical layout; (b) imaging system; (c) imaging effect

和 AWARE-10 之处在于主光学系统采用类双高斯设计,主要原因是球透镜焦距大于 150 mm 时,可加工成球透镜的玻璃毛坯少之又少,而且即使有足够大的玻璃毛坯,成本也非常高。

3.3.3 基于平面的多尺度成像系统

2016 年,哈尔滨工业大学陈婷^[43]设计了平面多尺度成像系统,如图 32 所示。次级光学系统为非均匀阵列,且采用自由曲面设计,共 11×11 个次级透镜阵列,单个阵列最大成像视场为 34.6° ,由于像面是平面,故该系统可使用单片集成探测器或探测器阵列采集图像,借助后期图像处理技术实现宽场成像;虽然平面多尺度成像系统的性能比传统平面成像系统要提高近 20 倍,一定程度上可以媲美曲面成像效果,但是光学系统布局更为复杂,并不满足轻量化、小型化的实际需求。

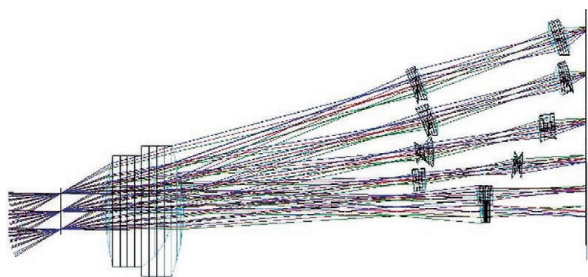


图 32 平面多尺度成像系统^[43]

Fig. 32 Planar multi-scale imaging system^[43]

综上所述,目前关于多尺度成像系统的相关研究成果较多,利用大尺度主光学系统收集更多的光能、进行初步像差校正,并结合小尺度次级光学系统在探测器上成像的方式,可有效克服传统成像中大视场和高分辨率不可兼得的矛盾,是实现广域高分辨率成像的有效途径。但次级光学系统的尺寸和复杂度主要取决于需要校正的像差类型及大小,在次级成像光学系统设计过程中,如何权衡信息容量和透镜复杂度是一个设计难点。

3.4 多镜头拼接系统

多镜头拼接系统将多个小相机按一定规则进行排列,结合后期计算成像技术获取广域高分辨率图像。根据成像模式,可分为全景成像、仿复眼成像、双模式成像及多分辨率成像系统。

3.4.1 全景成像系统

瑞士洛桑联邦理工学院在多镜头全景成像方面研究成果颇丰^[62-69]。2012 年,瑞士洛桑联邦理工学院 Afshari 等^[62-65]设计了多镜头成像系统 Panoptic,如图 33 所示。该系统将 100 个微相机分 7 层排布在一个半径为 13 cm 的半球面上,各个微相机具备不同的视角和焦点,邻近微相机视场相互重叠,保证视场内所有的物点都能被探测到。100 个微相机分成 5 组,由 5 个现场可编程门阵列(FPGA)并行采集处理图像,一个中央 FPGA 负责全景图像的重建。Panoptic 系统虽然视场很大,但分辨率较低,在实际使用过程中效果其实并不理想。2013 年,该学院 Akin 等^[66]在 Panoptic 系统的基础上研制了 OMNI-directional video recording system (OMNI-R)系统,如图 34 所示。OMNI-R 系统由 44 个微相机构成,分 4 层排布,从上往下镜头数量分别为

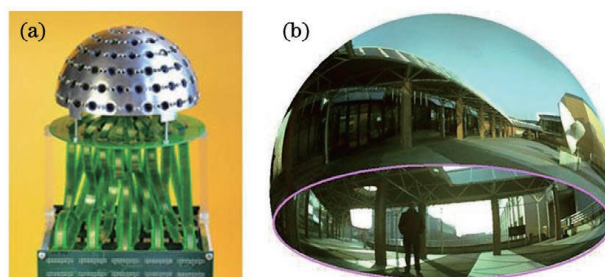


图 33 Panoptic 系统机械结构和全景图像^[63]。(a)机械结构;(b)全景图像

Fig. 33 Mechanical structure of Panoptic system and panoramic image^[63]. (a) Mechanical structure; (b) panoramic image

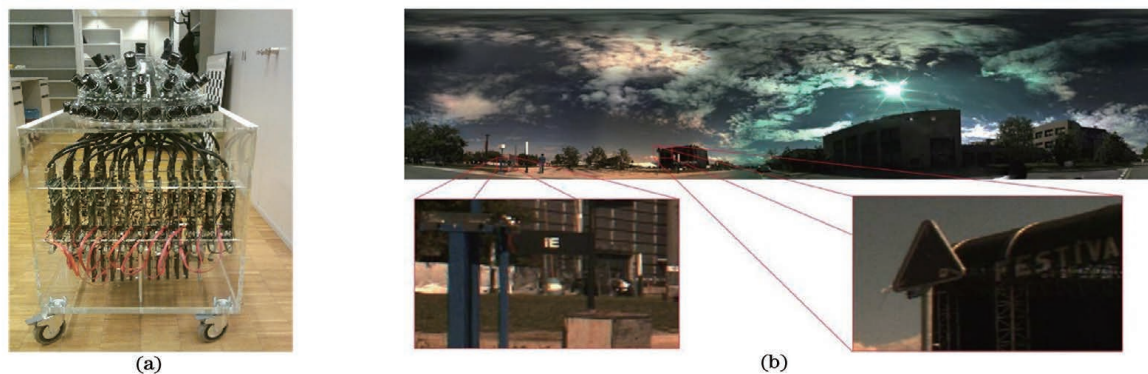


图 34 OMNI-R 系统和成像效果^[66]。(a)OMNI-R 系统;(b)成像效果

Fig. 34 OMNI-R imaging system and imaging effect^[66]. (a) OMNI-R imaging system; (b) imaging effect

1,6,15,22个,单个子镜头焦距为6 mm,视场角为 $53^{\circ} \times 43^{\circ}$,系统总分辨率为2160万,总视场角为 $360^{\circ} \times 100^{\circ}$ 。此外,系统采用22个XUPV5-LX11OTFPGA处理板,成像帧频达30 frame/s,可实现对半球形穹顶视场的实时成像。

2014年,该团队^[67]对OMNI-R进行改进,研制出了GigaEye-1系统。GigaEye-1与OMNI-R结构相似,不同之处在于GigaEye-1的成像模式有2种:系统帧频为9.5 frame/s时,系统分辨率为8230万;

帧频为30 frame/s时,分辨率为2162万。图35展示了GigaEye-1系统的实物图和成像效果。图35(b)中最大的十字圆圈处为GigaEye-1所在位置,H、I、J为目标所在位置。图35(c)展示了静态场景下GigaEye-1的成像效果,此时目标距离系统距离分别为492,568,499 m。图35(d)展示了动态场景下GigaEye-1的成像效果,运动的汽车和飞机距GigaEye-1的距离分别为560,1500 m。总体而言,GigaEye-1在静态和动态场景下的成像质量均较好。

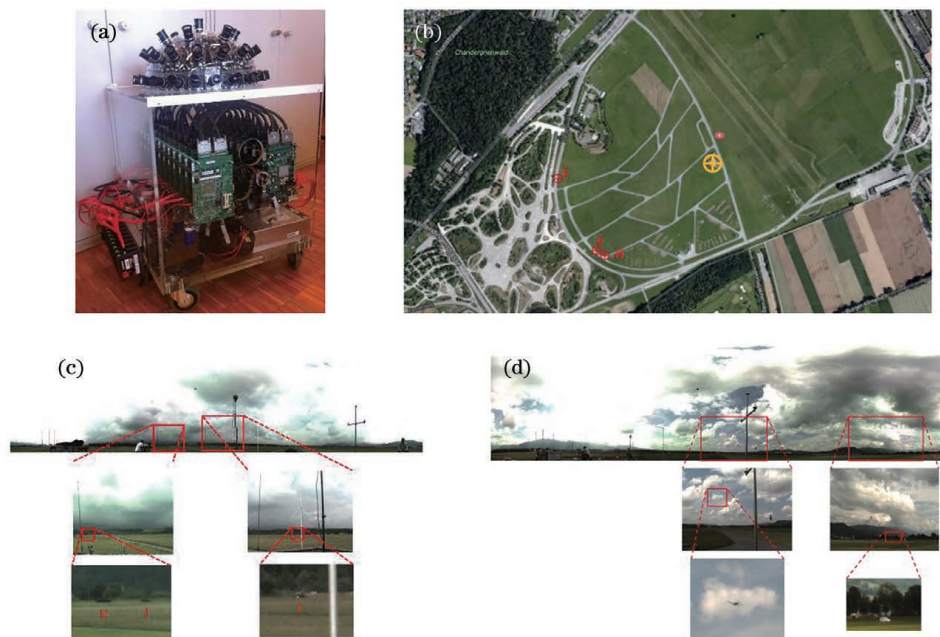


图35 GigaEye-1^[67]。(a)成像系统;(b)实验区域地图;(c)静态实验效果;(d)动态实验效果

Fig. 35 GigaEye-1^[67]. (a) Imaging system; (b) test area map; (c) static test effect; (d) dynamic test effect

2016年,该团队^[68]研制出一款广域高分辨率多镜头GigaEye-2系统。该系统采用焦距为50 mm的尼康镜头,探测器像元尺寸为 $6.4 \mu\text{m} \times 6.4 \mu\text{m}$,像素为2000万,镜头呈双层

排布,目前最多可排布32个。图36(a)为16镜头双层排布,GigaEye-2使用FPGA多层处理结构处理10亿像素级数据,高分辨率、高帧频输出全景视频。

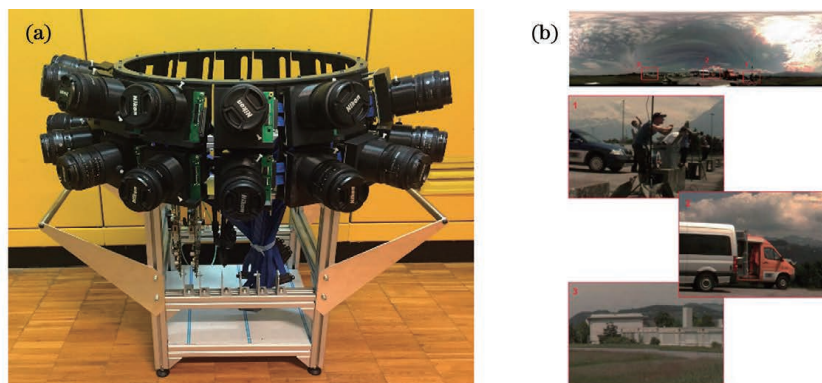


图36 GigaEye-2系统^[68]。(a)16镜头双层排布;(b)高分辨率全景图像和局部细节图

Fig. 36 GigaEye-2 system^[68]. (a) 16 lenses arranged in double layers; (b) high-resolution panoramic image and partial detail image

2017年,该学院^[69]又研制出一种小型高清仿复眼成像系统,如图37所示。该系统球壳半径大小5 mm,像素数达110万,全视场为 $180^{\circ} \times 180^{\circ}$,系统帧频达25 frame/s,具有分布式照明系统,可在暗环

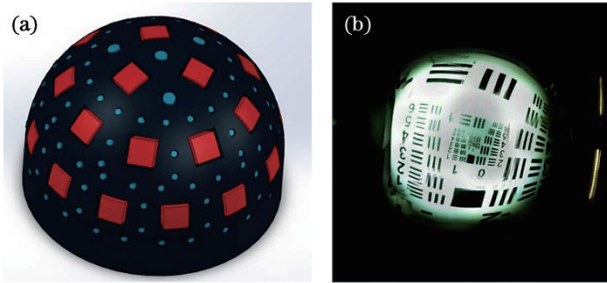


图37 小型高清仿复眼成像系统和全景图像^[69]。

(a) 成像系统; (b) 全景图像

Fig. 37 Small high-definition imitation compound eye imaging system and panoramic image^[69].

(a) Imaging system; (b) panoramic image

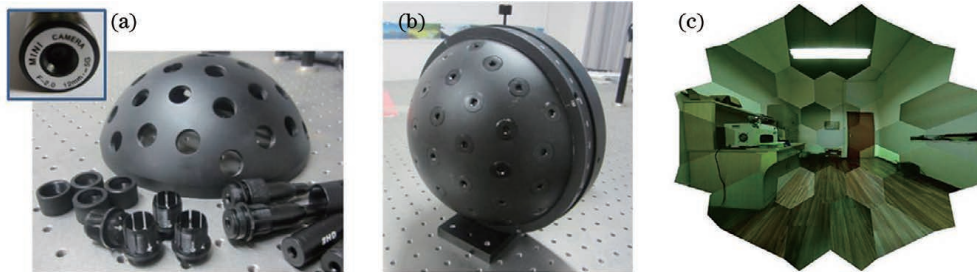


图38 人工复眼成像系统^[71]。(a)机械结构; (b)实物; (c)全景图像

Fig. 38 Artificial compound eye imaging system^[71]. (a) Mechanical structure; (b) material object; (c) panoramic image

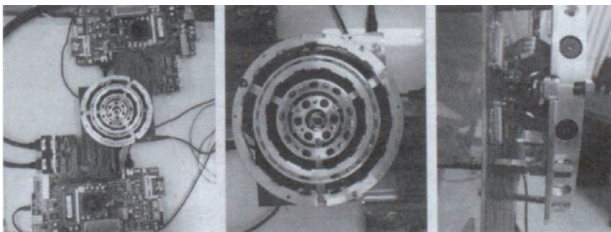


图39 平面多镜头成像系统实物图^[72]

Fig. 39 Physical maps of planar multi-lens imaging system^[72]

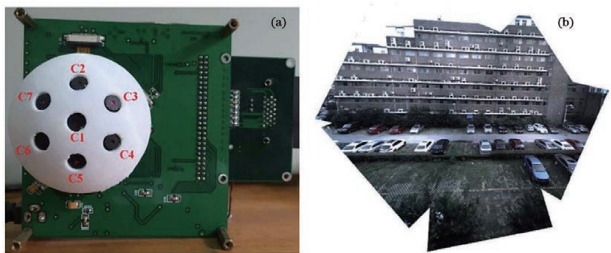


图40 广域成像系统实物图和全景图像^[73]。

(a) 系统实物图; (b) 全景图像

Fig. 40 Physical map of large field of view imaging system and panoramic image^[73].

(a) Imaging system; (b) panoramic image

境下实现近距离内窥成像。

此外,2014年,中国科学院重庆绿色智能技术研究院史立芳等^[70-71]对广域人工复眼成像结构进行了研究,如图38所示。该系统单个镜头焦距为12 mm,视场为 24° ,采用像元大小为 $4.25 \mu\text{m} \times 4.25 \mu\text{m}$ 、像素数为1900万的CMOS探测器进行成像,共使用37个完全相同的镜头通过后期图像拼接算法实现 118° 广域成像。

2016年,中国科学技术大学卢钰^[72]设计出一种覆盖半球空间视场的平面多镜头成像系统,如图39所示。该系统结构十分灵活,可根据视场需求自由组合。2017年,在其研究基础之上开发出一款由7个子相机构成的广域成像系统,如图40所示^[73-74],其中单个子相机焦距为3.1 mm,视场为 $49^{\circ} \times 41^{\circ}$,系统总视场约为 75° ,有效分辨率达1100万像素,经图像拼接算法处理后的全景图像成像质量良好。

3.4.2 仿复眼成像系统

昆虫复眼具有体积小、视场大和灵敏度高等特点,研究人员受启于昆虫复眼的独特优势,研制出一系列仿复眼成像系统。2014年,北卡罗莱纳大学Law等^[75-77]设计了一种新型的地基天文望远镜,该望远镜由24个口径为61 mm的小型望远镜构成,如图41所示^[77]。单个小型望远镜焦距为85 mm, F数为1.4,转接成像的探测器是一具有2880万像素的CCD,可对 $384^{\circ} \times 384^{\circ}$ 的区域成像;24个小型望远镜排布在半球形穹顶上,结合后期图像拼接技术实现6.91亿像素数成像,如图42所示^[77],可探测星等为16。

2015年,长春理工大学付跃刚等^[78]设计出一种仿生复眼光学系统,该系统的子眼系统分为中心子眼系统和边缘子眼系统,边缘子眼系统视场大、分辨率低,有利于实现目标的探测和捕获;中心子眼系统分辨率高、视场小,有利于实现目标的精确识别。中心、边缘子眼系统的焦距分别为60,20 mm; F数分别为2.3,2.6。系统利用31个组元可实现全视场

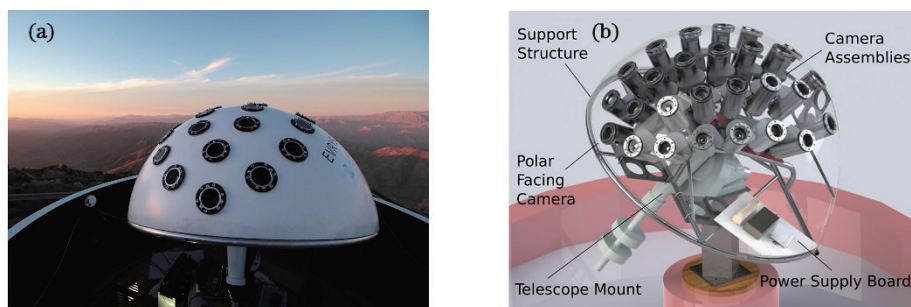


图 41 Evrscope 系统实物图和剖面图^[77]。(a)系统实物图;(b)剖面图

Fig. 41 Evrscope imaging system and its profile^[77]. (a) Imaging system; (b) profile

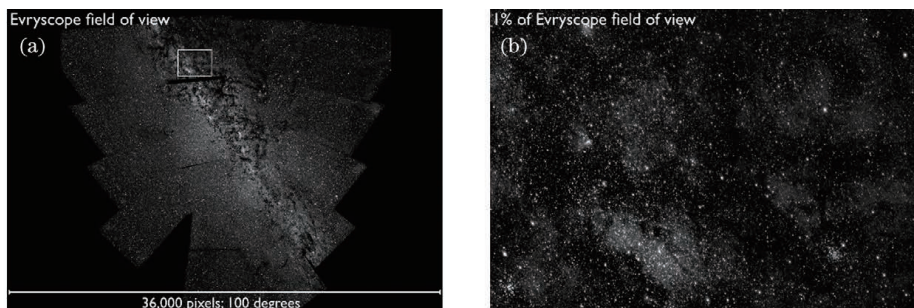


图 42 Evrscope 系统全视场图像和局部细节图^[77]。(a)全视场图像;(b)局部细节图

Fig. 42 Full field of view image of Evrscope system and its partial detail^[77]. (a) Full field of view image; (b) partial detail

53.9°成像,结构如图 43(a)、(b)所示^[78]。边缘子眼系统可在 0~3 km 内捕获 5 m 大小目标,中心子眼

系统可在 0~3 km 内分辨 5 m 大小目标,成像效果如图 43(c)、(d)所示^[78]。

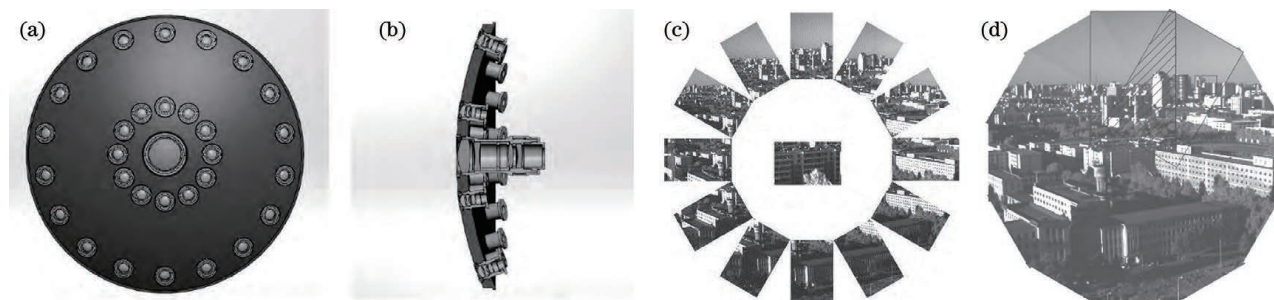


图 43 仿生复眼成像系统^[78]。(a)俯视图;(b)剖面图;(c)子系统图像;(d)拼接图像

Fig. 43 Bionic compound eye imaging system^[78]. (a) Top view; (b) section view; (c) subsystem image; (d) stitched image

2017年,在第一代仿生复眼光学系统的基础上又研制出一款紧凑型的仿生复眼成像系统,如图 44所示^[79]。通过降低子眼密度的填补字法和球面固定本体的设计方法,同时完善复眼视场拼接理论,整体系统呈三维层叠式结构分布,第 1 阵列子眼系统和中心子镜头避免了机械干涉,保证了球面固定本体有足够空间固定第 2 阵列子眼系统,与第一代仿生复眼光学系统相比,降低了系统尺寸,提高了系统集成度,有利于系统的实际应用。

2019年,中国科学院长春光学精密机械与物理

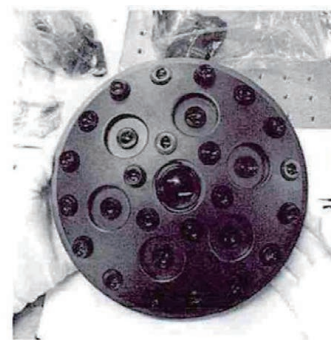


图 44 紧凑型仿生复眼成像系统^[79]

Fig. 44 Compact bionic compound eye imaging system^[79]

研究所王元元^[80-81]设计出一种曲面仿生复眼成像系统,如图45所示,117个子镜头按照一定规律排布构成微透镜阵列,中心弧线上约排布12个小镜头,视场达 $120^\circ \times 120^\circ$,分辨率达 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 以上,质量仅121 g。

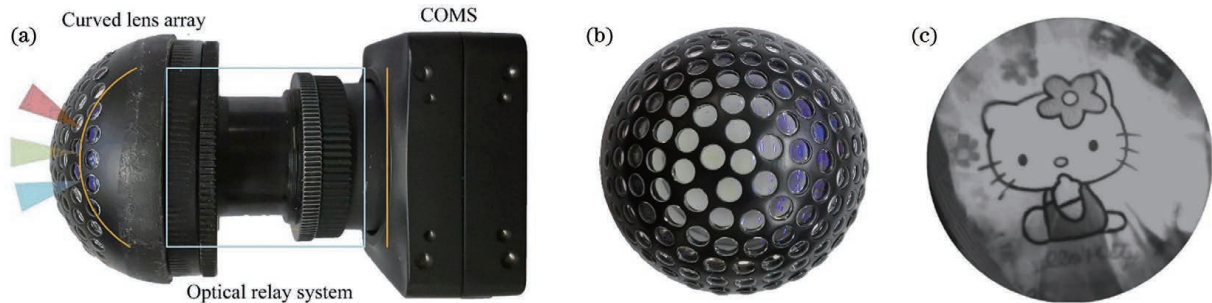


图45 曲面仿生复眼成像系统^[81]。(a)实物图;(b)曲面微透镜阵列;(c)算法恢复图像

Fig. 45 Curved bionic compound eye imaging system^[81]. (a) Prototype; (b) curved micro lens array; (c) restored image obtained by algorithm

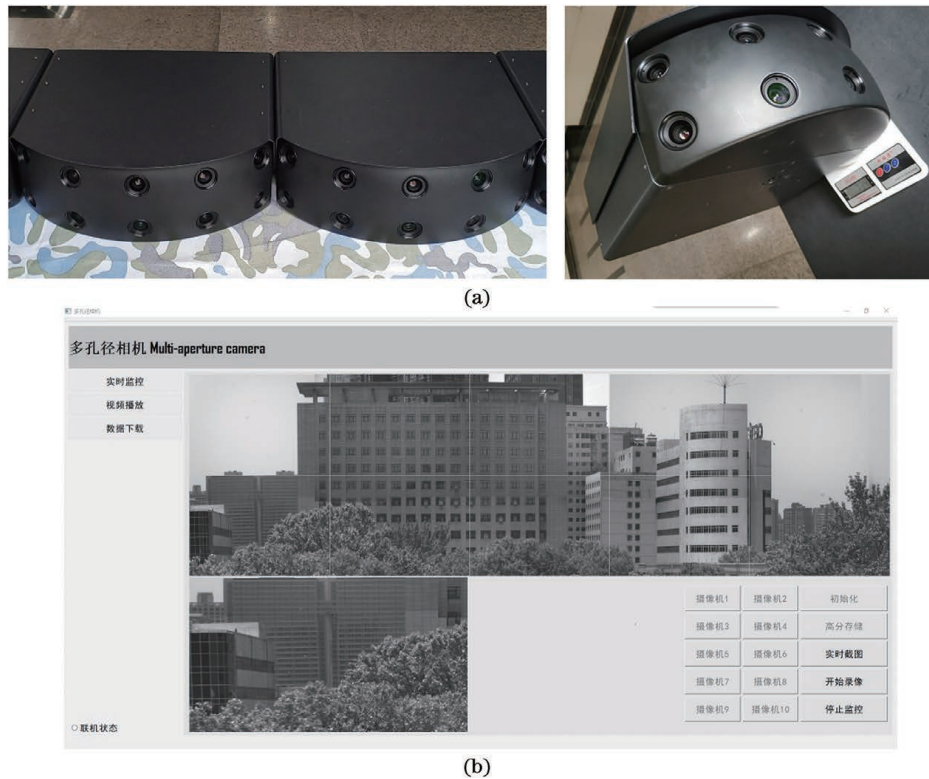


图46 多孔径成像系统样机和成像效果^[82]。(a)样机;(b)成像效果

Fig. 46 Multi-aperture imaging system prototype and imaging effect^[82]. (a) Prototype; (b) imaging effect

2020年,北京理工大学裘溯等^[83-84]研制出一种基于微端面光纤面板的仿复眼成像系统。利用9个小型微透镜进行广域成像,以光纤面板进行图像传输,对CMOS探测器和光纤面板进行耦合实现图像实时采集和输出。系统子孔径焦距为9 mm,总视场达 83.2° ,帧频达9.5 frame/s,在广域实时成像的前提下,系统质量轻、体积小、功耗低。

西安电子科技大学邵晓鹏等^[82]设计了一种多孔径成像系统,如图46所示。系统总视场为 $123.5^\circ \times 38.5^\circ$,像素数超1亿,可实现图像、视频实时全局查看,且支持局部细节信息查看、导出等功能。

3.4.3 双模式成像系统

2017年,中国科学院光电技术研究所许盟等^[85-86]设计一种双模式复眼成像系统,如图47所示。在广域工作模式下,该系统与传统复眼系统相同,利用多孔径、广域成像能力获得低分辨率图像;在高分辨率工作模式下,该系统所有子孔径指向同一区域,对获取的多幅子图像进行拼接和重建获得



图 47 双模式复眼成像系统^[85]。(a)高分辨率模式；
(b)广域模式

Fig. 47 Dual-mode compound eye imaging system^[85].
(a) High resolution mode; (b) large field of view mode

高分辨率图像。双模式复眼成像系统单个子相机焦距为 12 mm, 光圈数为 4, 像元大小为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 广域模式下, 系统总视场达 $85^\circ \times 66^\circ$, 高分辨率模式下, 最高分辨率对应的线对数为 3.56 lp/mm, 是广域模式下分辨率的 2 倍左右。该系统验证了双模式成像的可行性, 为复眼成像的发展提供了新思路。

3.4.4 多分辨率成像系统

由于人眼视觉传递系统呈单线联系, 故视网膜

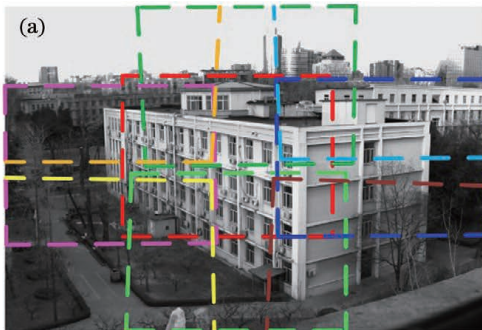


图 49 成像效果^[87]。(a)9 个子孔径拼接图像;(b)中心子孔径超分辨率图像,4 个局部区域中,左边是超分辨率图像,右边是子孔径原图像

Fig. 49 Imaging effect^[87]. (a) 9 sub-aperture stitching image; (b) central sub-aperture super-resolution image, among the 4 local areas, the left is the super-resolution image, and the right is the sub-aperture original image

次年,曹杰等^[88]设计出多分辨率成像系统,如图 50 所示,利用 11 个相机镜头组成了四级成像拍摄模块,分别为最高分辨率、次高分辨率、次低分辨率、最低分辨率模块,视场拼接如图 51 所示^[88]。系统总视场达 $150.8^\circ \times 37.8^\circ$, 在 100 m 距离处的成像效果如图 52 所示^[88]。四级成像模块对扩大系统视场具有显著效果,同时减小了 1/17.2 的数据冗余,在极大减少数据量的情况下实现了广域高分辨率成像。

中央凹对光的感受分辨率较高,多分辨率成像系统仿人眼成像,光学系统中不同模块的分辨率不同,北京理工大学在多分辨率成像方面的研究成果较丰富。2019 年,Wang 等^[87]提出一种复合仿生成像系统,如图 48 所示。系统由 3×3 个孔径构成,中心子孔径前放置 Risley 棱镜,通过两侧的电机控制中心子孔径对子图像进行亚像素位移采样,以实现曲面人工复眼超分辨率成像,系统焦距为 12 mm, F 数为 1.4, 探测器像元大小为 $3.75 \mu\text{m}$, 全视场可达 $49.2^\circ \times 33.8^\circ$, 成像效果如图 49 所示^[87], 中心子孔径超分辨率成像效果较好,该方法对视场扩展和视网膜中央凹视觉具有一定的有效性。

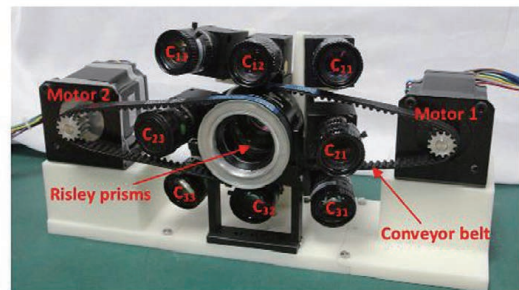


图 48 复合仿生成像系统实物图^[87]

Fig. 48 Composite simulacrum imaging system^[87]

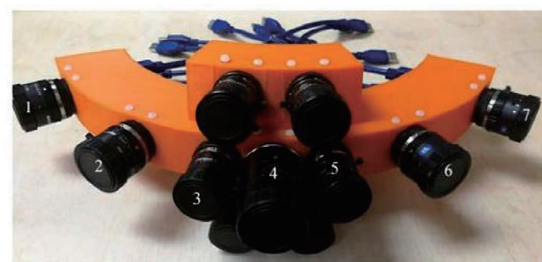
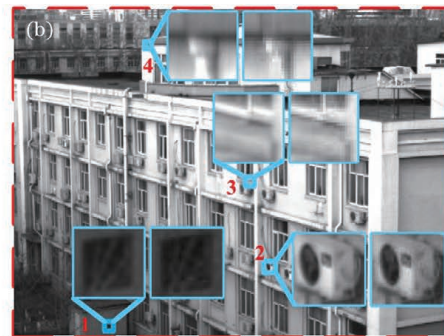


图 50 多分辨率成像系统实物图^[88]

Fig. 50 Physical map of multi-resolution imaging system^[88]

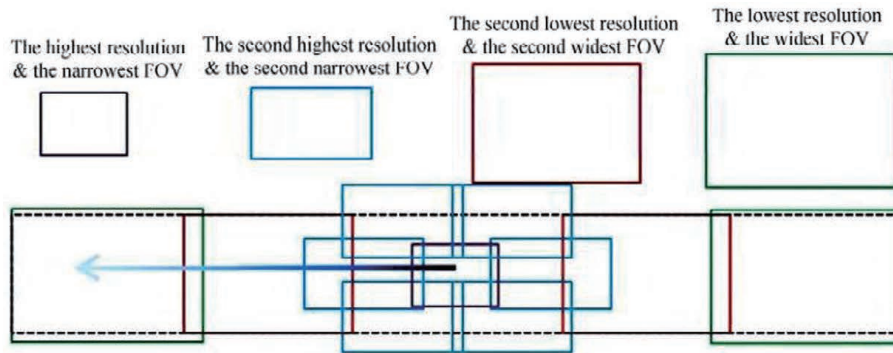


图 51 四级成像视场拼接示意图^[88]

Fig. 51 Schematic of view stitching for four-level imaging field^[88]

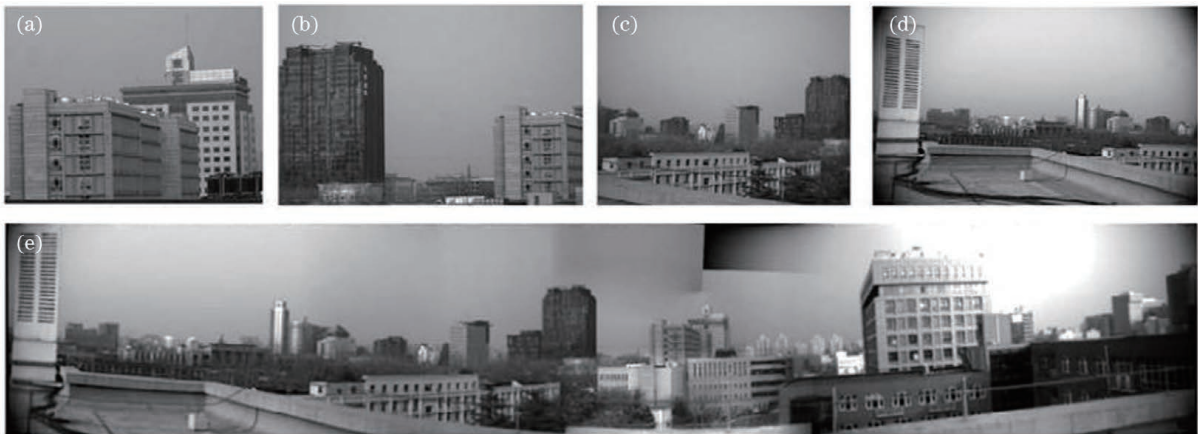


图 52 100 m 处成像效果^[88]。(a)最高分辨率图像;(b)次高分辨率图像;(c)次低分辨率图像;(d)最低分辨率图像;
(e)多级分辨率图像拼接

Fig. 52 Imaging effect at 100 m^[88]. (a) Highest resolution image; (b) sub-high resolution image; (c) sub-low resolution image; (d) lowest resolution image; (e) multi-resolution image stitching

2021年,Cui等^[89]对复合仿生复眼成像系统进行了改进,如图53所示。与复合仿生复眼成像系统不同之处在于将Risley棱镜的2个电机放到了Risley棱镜两侧,8个子相机中 $C_{11} \sim C_{16}$ 用于高分辨率成像, C_{21} 和 C_{22} 用于低分辨率成像,系统全视场可达 $154^\circ \times 42^\circ$,数据冗余减小了87.62%,系统成像效果如图54所示^[89],其中图54(a)分别是超分辨率、高分

分辨率、低分辨率成像情况下的图像;图54(b)是离目标800,600,1200 m处的成像效果;图54(c)是图54(b)中局部图像的原始图像与超分辨图像的对比。

综上所述,多镜头拼接系统也是实现广域高分辨率的有效途径之一,4种成像系统不涉及光学元件的设计、装调和检测等,具有简单、易实现的优点,但由于使用多个镜头,整个系统的体积大、质量大。

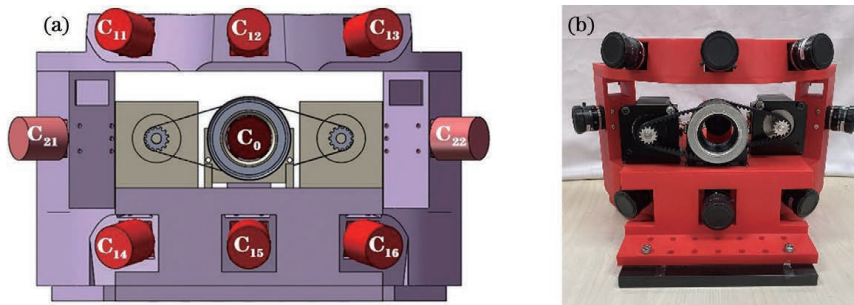


图 53 改进的复合仿生复眼成像系统模型和实物图^[89]。(a)系统模型;(b)实物图

Fig. 53 Improved composite bionic compound eye imaging system model and prototype^[89]. (a) System model; (b) prototype

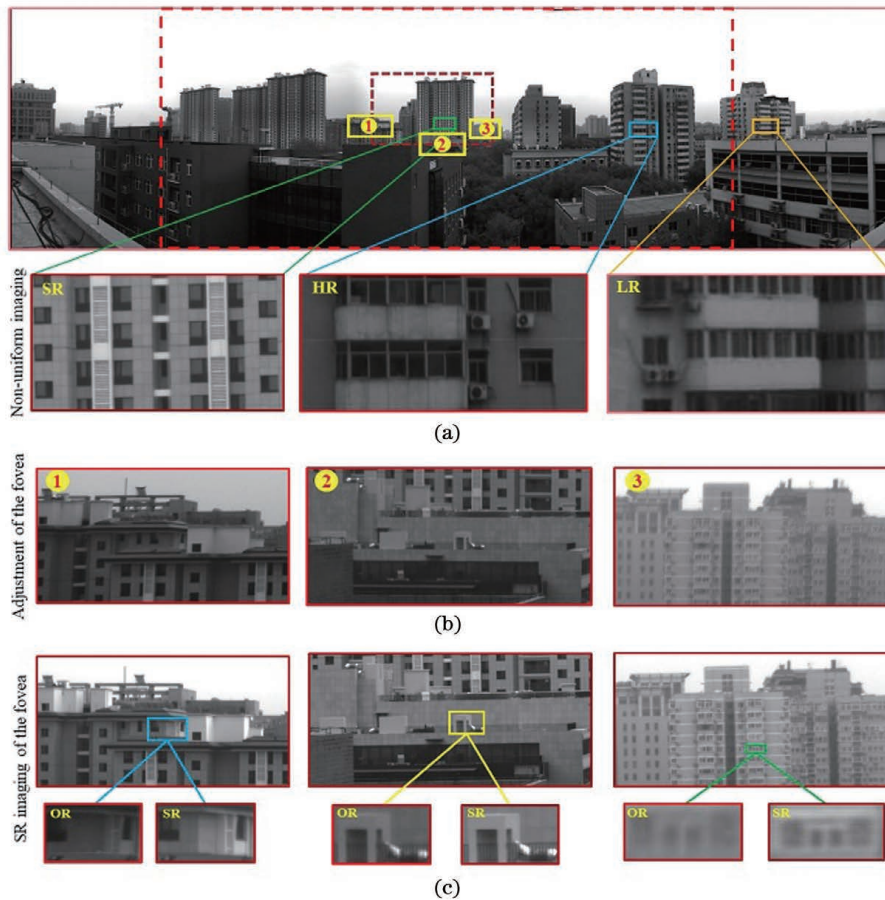


图 54 系统成像效果^[89]。(a)不同分辨率下的非均匀成像;(b)不同距离处的成像效果;(c)不同距离处局部信息的原始图与超分辨率图对比

Fig. 54 Imaging effects.^[89] (a) Non-uniform imaging at different resolutions; (b) imaging effects at different distances; (c) comparison of original image and super-resolution image of local information at different distances

此外,多探测器拼接成像和多镜头拼接成像都将多个小尺寸成像器件拼接为一个等效的大尺寸成像器件。不同点在于两者的成像机理不同,多探测器拼接成像是像方视场拼接,通过对光学系统像面进行分光,透射到多个成像器件的感光面,借助图像拼接技术实现大视场高分辨成像;而多镜头拼接成像是物方视场拼接,通过将物方视场分成多个子视场并单独成像,利用图像拼接技术实现广域高分辨率成像。

4 结 论

广域高分辨率计算光学成像系统因成像范围广、成像性能突出等优势在航空侦察、生态监控、社会活动支持等方面发挥巨大的作用。随着人们对光电成像技术的不断研究,光电成像设备也相应有了更高的要求。主要从成像系统的原理、性能参数及成像效果 3 个方面阐述了典型计算光学成像系统的最新研究进展,其中在计算光学成像系统中,主要对

单镜扫描拼接、多探测器拼接、多尺度成像、多镜头拼接成像 4 个方面进行了分析研究。

多尺度拼接成像方式利用主物镜强大的视场收集能力和次级系统有效校正局部视场像差的能力实现亿级像素成像,是目前实现广域高分辨率的有效手段,但庞大的数据量对硬件要求较高,数据处理仍是一个难点问题。单镜扫描拼接成像利用单个高分辨率镜头进行扫描后借助计算成像技术实现图像拼接,虽然该方法比较容易工程化,技术相对较成熟,但先扫描后拼接的方式决定其不适用于实时成像,仅适用于对静态或准静态场景目标进行成像。多探测器拼接成像可集成多片探测器实现大规模像素成像,但这种方法很难实现无缝拼接,且成像系统体积大、造价昂贵。多镜头拼接是一种直接、简单且容易实现广域高分辨率成像的方式,与单镜扫描相比,无需旋转结构,但整体系统体积庞大、成本高,同时面临相邻镜头间的视场重叠问题,4 种不同成像方式的对比如表 1 所示。

表1 四种光学系统优缺点分析

Table 1 Analysis of the advantages and disadvantages of the four optical systems

Imaging method	Single-lens scan	Multi-detector stitching	Multi-scale imaging	Multi-camera stitching
Advantage	Mature technology and easy engineering	Simple principle and billion pixel imaging	Effectively realize large field of view and high-resolution imaging	Simple and direct, without rotating structure
Disadvantage	Only suitable for static or quasi-static imaging, real-time imaging is difficult	Large size, high cost, and difficult to achieve seamless splicing	The amount of data is redundant, and the hardware processing pressure is relatively high	Huge volume and high cost

4种成像技术中的缺陷则是未来计算光学成像系统有待解决的重点问题。此外,从计算成像全链路角度出发,综合考虑光学系统、探测器、数字图像处理算法等方面,实现高动态范围实时成像仍然是未来发展的主要方向。

参 考 文 献

- [1] Cossairt O, Nayar S. Spectral focal sweep: extended depth of field from chromatic aberrations [C]//2010 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), March 29-30, 2010, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [2] Wang Y Z. Fisheye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006.
王永仲. 鱼镜头光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] Schroeder D J. Astronomical optics [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2000.
- [4] Lukac R. Computational photography: methods and applications [M]. Boston: CRC Press, 2016.
- [5] Lohmann A W. Scaling laws for lens systems [J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 4996-4998.
- [6] Cossairt O S, Miao D, Nayar S K. Gigapixel computational imaging [C]//2011 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 8-10, 2011, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [7] Kopf J, Uyttendaele M, Deussen O, et al. Capturing and viewing gigapixel images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 93.
- [8] GigaPan [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://gigapan.com/gigapans/15374>, 2009.
- [9] Sargent R, Bartley C, Dille P, et al. Timelapse GigaPan: Capturing, sharing, and exploring timelapse gigapixel imagery [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.229.3933>.
- [10] Ben-Ezra M. Adigital gigapixel large-format tile-scan camera [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, 31(1): 49-61.
- [11] Muraki Y, Sumi T, Abe F, et al. Search for machos by the MOA collaboration [J]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 1999, 133: 233-246.
- [12] Sako T, Sekiguchi T, Sasaki M, et al. MOA-cam3: a wide-field mosaic CCD camera for a gravitational microlensing survey in New Zealand [J]. Experimental Astronomy, 2008, 22(1/2): 51-66.
- [13] Kahn S M, Kurita N, Gilmore K, et al. Design and development of the 3.2 gigapixel camera for the large synoptic survey telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7735: 77350J.
- [14] Ivezić Ž, Connolly A J, Jurić M. Everything we'd like to do with LSST data, but we don't know (yet) how [J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2016, 12(S325): 93-102.
- [15] Ivezić Ž, Kahn S M, Tyson J A, et al. LSST: from science drivers to reference design and anticipated data products [EB/OL]. (2008-05-15) [2021-05-15]. <https://arxiv.org/abs/0805.2366>.
- [16] Neill D, Angeli G, Claver C, et al. Overview of the LSST active optics system [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9150: 91500G.
- [17] Souchon J P, Paparoditis N, Martin O, et al. Is there an ideal digital aerial camera [EB/OL]. [2021-05-15]. <https://www.ixueshu.com/document/1a062edd55ae9e81318947a18e7f9386.html>.
- [18] Ebbets D, Argabright V, Stober J, et al. In-flight photometric performance of the 96 Mpx focal plane array assembly for NASA's Kepler exoplanet mission [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8146: 81460H.
- [19] Ebbets D, Atcheson P, Stewart C, et al. Optical performance of the 100-sq deg field-of-view telescope for NASA's Kepler exoplanet mission [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8146: 81460G.
- [20] Leininger B, Edwards J, Antoniadis J, et al.

- Autonomous real-time ground ubiquitous surveillance-imaging system (ARGUS-IS) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6981: 69810H.
- [21] Li F Q, Zhang X H, Cai W J, et al. Parameter calculation of splitting mirrors in optical-butting focal plane [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (13): 1308001.
李富强, 张孝弘, 蔡伟军, 等. 光学拼接焦平面中拼接反射镜参数的计算[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1308001.
- [22] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
- [23] Son H S, Marks D L, Tremblay E, et al. A multiscale, wide field, gigapixel camera[C]//Imaging Systems and Applications 2011, July 10-14, 2011, Toronto, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2011: JTUE2.
- [24] Son H S, Marks D L, Hahn J, et al. Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16132-16138.
- [25] Marks D L, Brady D J. Gigagon: a monocentric lens design imaging 40 gigapixels [C]//Imaging Systems 2010, June 7-8, 2010, Tucson, Arizona, United States. Washington, D.C.: OSA, 2010: ITuC2.
- [26] Marks D L, Tremblay E J, Ford J E, et al. Microcamera aperture scale in monocentric gigapixel cameras[J]. Applied Optics, 2011, 50(30): 5824-5833.
- [27] Marks D L, Brady D J. Close-up imaging using microcamera arrays for focal plane synthesis [J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 033205.
- [28] Tremblay E J, Marks D L, Brady D J, et al. Design and scaling of monocentric multiscale imagers [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4691-4702.
- [29] Kittle D S, Marks D L, Son H S, et al. A testbed for wide-field, high-resolution, gigapixel-class cameras[J]. The Review of Scientific Instruments, 2013, 84(5): 053107.
- [30] Pang W B, Brady D J. Galilean monocentric multiscale optical systems [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20332-20339.
- [31] Golish D R, Vera E M, Kelly K J, et al. Development of a scalable image formation pipeline for multiscale gigapixel photography [J]. Optics Express, 2012, 20(20): 22048-22062.
- [32] Marks D L, Son H S, Kim J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 083202.
- [33] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. Nature, 2012, 486(5): 386-389.
- [34] Son H S, Johnson A, Stack R A, et al. Optomechanical design of multiscale gigapixel digital camera [J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1541-1549.
- [35] Youn S H, Son H S, Marks D L, et al. Optical performance test and validation of microcameras in multiscale, gigapixel imagers [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3712-3723.
- [36] Nakamura T, Kittle D S, Youn S H, et al. Autofocus for a multiscale gigapixel camera [J]. Applied Optics, 2013, 52(33): 8146-8153.
- [37] Marks D L, Llull P R, Phillips Z, et al. Characterization of the AWARE 10 two-gigapixel wide-field-of-view visible imager [J]. Applied Optics, 2014, 53(13): C54-C63.
- [38] Qi J K, Zhou F, Yao G, et al. A newsuper-large field of view and small distortion optical system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(2): 30-35.
戚均恺, 周峰, 姚罡, 等. 一种新型超大视场小畸变光学系统 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(2): 30-35.
- [39] Zhuang X X, Ruan N J, He J P, et al. Multiscale wide field-of-view gigapixel imaging technique [J]. Space Return & Remote Sensing, 2014, 35(5): 1-8.
庄绪霞, 阮宁娟, 贺金平, 等. 多尺度大视场十亿像素成像技术 [J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(5): 1-8.
- [40] Feng Y C. Research and simulation of wide-area high-resolution camera based on computational imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
冯彦超. 基于计算成像的广域高分辨相机的研究与仿真 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [41] Wu Y S. Research on wide FOV high resolution earth observation system based on multi-scale stitching imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
吴懿思. 基于 Multi-scale 拼接成像的宽视场高分辨对地观测系统的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [42] Wu J, Xiong B, Lin X, et al. Snapshot hyperspectral volumetric microscopy [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24624.
- [43] Chen T. Sphere/plane multi-scale & multi-aperture optical imaging systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
陈婷. 球面/平面多尺度多孔径光学成像系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [44] Xue L. Design of wide field of view high resolution multi-scale multi-aperture computing imaging system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
薛露. 宽视场高分辨率多尺度多孔径光学计算成像

- 系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [45] Xu F G. Research on design of wide-field and high-resolution imaging optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
徐奉刚. 广域高分辨率成像光学系统设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [46] Du J. Research on concentric wide field of view high resolution imaging method [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
杜娟. 共心宽视场高分辨率成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [47] Liu F, Wei Y Z, Han P L, et al. Design of multi-scale wide-area high-resolution computational imaging system based on concentric spherical lens[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.
刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084201.
- [48] Chen X X. Development of a monocentric multiscale imaging system with sparse subcamera array [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
陈晓祥. 一种稀疏次级相机阵列的共心多尺度成像系统的研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [49] Lu W W, Chen S Y, Zhai D D, et al. Biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system with wide view and high resolution[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 311-315.
路文文, 陈善勇, 翟德德, 等. 混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统[J]. 应用光学, 2019, 40(2): 311-315.
- [50] Lu W W, Chen S Y, Xiong Y P, et al. A single ball lens-based hybrid biomimetic fish eye/compound eye imaging system[J]. Optics Communications, 2021, 480: 126458.
- [51] Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.
李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0222001.
- [52] Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Design of optical system of UAV-borne ultra-low altitude and wide coverage remote sensing camera [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422001.
李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422001.
- [53] Li J Y, Feng W X, Liu F, et al. Design of airborne multi-scale wide-field-of-view and high-resolution imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208002.
李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0208002.
- [54] Shen Y. Research on super large field of view optical imaging technology based on concentric lens [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
沈阳. 基于同心球镜的超大视场光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.
- [55] Shen Y, Wang H, Wang C C, et al. Optical design of a distributed zoom concentric multiscale meteorological instrument[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): 5168-5179.
- [56] Liu F, Liu J W, Shao X P. Design of high integration and miniaturization concentric multiscale optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1275-1282.
刘飞, 刘佳维, 邵晓鹏. 高集成度小型化共心多尺度光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1275-1282.
- [57] Yang W, Liu J W, Han P L, et al. Design of an infrared zoom imaging system based on concentric spherical lens with wide FOV and high resolution[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(6): 805-812.
杨威, 刘佳维, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(6): 805-812.
- [58] Wu X X, Wang X R, Yuan Y, et al. Design of sub-imaging system based on monocentric multiscale dual resolution imaging[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2644-2650.
吴雄雄, 王晓蕊, 袁影, 等. 同心多尺度成像模式下的高分辨率成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2644-2650.
- [59] Wu X X. Design and development of wide FOV high resolution optical system based on multisacle imaging principle[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
吴雄雄. 基于多尺度成像原理的宽视场高分辨光学系统设计与研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [60] Marks D L, Son H S, Phillips Z F, et al. Multiscale camera objective with sub 2 arcsec resolution, 36 degree field-of-view [C] // Computational Optical Sensing and Imaging 2014, June 22-26, 2014, Kohala Coast, Hawaii, United States. Washington, D. C.: OSA, 2014: CTh1C.3.

- [61] Llull P, Bange L, Phillips Z F, et al. Characterization of the AWARE 40 wide-field-of-view visible imager[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1086-1089.
- [62] Afshari H, Popovic V, Tasci T, et al. A spherical multi-camera system with real-time omnidirectional video acquisition capability[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(4): 1110-1118.
- [63] Afshari H, Jacques L, Bagnato L, et al. The PANOPTIC camera: a plenoptic sensor with real-time omnidirectional capability[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2013, 70(3): 305-328.
- [64] Popovic V, Afshari H, Schmid A, et al. Real-time implementation of Gaussian image blending in a spherical light field camera [C] // 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), February 25-28, 2013, Cape Town, South Africa. New York: IEEE Press, 2013: 1173-1178.
- [65] Popovic V, Seyid K, Akin A, et al. Image blending in a high frame rate FPGA-based multi-camera system[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2014, 76(2): 169-184.
- [66] Akin A, Cogal O, Seyid K, et al. Hemispherical multiple camera system for high resolution omnidirectional light field imaging[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2013, 3(2): 137-144.
- [67] Cogal O, Akin A, Seyid K, et al. A new omnidirectional multi-camera system for high resolution surveillance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9120: 91200N.
- [68] Popovic V. Real-time computational gigapixel multi-camera systems[D]. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2016.
- [69] Cogal O, Leblebici Y. An insect eye inspired miniaturized multi-camera system for endoscopic imaging [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2017, 11(1): 212-224.
- [70] Shi L F. Research and experiment on imaging structure of wide-area artificial compound eye [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014.
史立芳. 广域人工复眼成像结构研究与实验[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [71] Cao A, Shi L F, Deng Q L, et al. Structural design and image processing of a spherical artificial compound eye [J]. *Optik*, 2015, 126 (21): 3099-3103.
- [72] Lu Y. Research on the key technology of large field of view and ultra-high resolution camera[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
卢钰. 大视场超高像素相机关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [73] Wang Y W, Cai B L, Lu Y, et al. Optical system design of artificial compound eye based on field stitching [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(6): 1277-1279.
- [74] Wang Y W. Research on key technologies of bionic compound eye for panoramic stereo imaging [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
王玉伟. 仿生复眼全景立体成像关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [75] Law N M, Fors O, Wulfken P, et al. The Evryscope: the first full-sky gigapixel-scale telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 91450Z.
- [76] Law N M, Fors O, Ratzloff J, et al. Evryscope science: exploring the potential of all-sky gigapixel-scale telescopes [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(949): 234-249.
- [77] Law N M, Fors O, Ratzloff J, et al. The Evryscope: design and performance of the first full-sky gigapixel-scale telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 99061M.
- [78] Fu Y G, Zhao Y, Liu Z Y, et al. Design of bionic compound eye optical system based on field of view stitching method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 422-429.
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.
- [79] Fu Y G, Zhao Y, Liu Z Y, et al. Design of compact bionic compound eye optical system used for target identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0602001.
付跃刚, 赵宇, 刘智颖, 等. 用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0602001.
- [80] Wang Y Y. Design and micromachining technology of surface bionic compound eye imaging system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
王元元. 曲面仿生复眼成像系统设计及微加工技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [81] 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.
- [82] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020001.

- 邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 020001.
- [83] Qiu S, Xue J A, Wang X, et al. A Large-field-of-view compact bionic compound eyes imaging system research [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(4): 11-18.
- 袁溯, 薛家安, 王霞, 等. 大视场紧凑型仿生复眼成像系统研究 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7(4): 11-18.
- [84] Xue J A, Qiu S, Wang X, et al. A compact visible bionic compound eyes system based on micro-surface fiber faceplate [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11438: 114380B.
- [85] Xu M. Design and experimental study on dual-mode compound eye imaging system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- 许盟. 双模式复眼成像系统设计及实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017.
- [86] Xu M, Wang Y Q, Wang C T, et al. Research on dual-mode compound eye imaging system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091102.
- 许盟, 王彦钦, 王长涛, 等. 双模式复眼成像系统研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091102.
- [87] Wang Z H, Cao J, Hao Q, et al. Combining compound eyes and human eye: a hybrid bionic imaging method for FOV extension and foveated vision [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11053: 110531I.
- [88] Cao J, Cui H, Meng L T, et al. Multi-resolution imaging with camera arrays on curved surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0411003.
- 曹杰, 崔焕, 孟令通, 等. 曲面相机阵列多分辨成像方法 [J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0411003.
- [89] Cui H, Hao Q, Cao J, et al. Curved retina-like camera array imaging system with adjustable super-resolution fovea [J]. Applied Optics, 2021, 60(6): 1535-1543.