

文章编号:1002-2082(2019)01-0311-05

混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统

路文文,陈善勇,翟德德,熊玉朋

(国防科技大学 智能科学学院,湖南 长沙 410073)

摘要:基于多尺度成像理论,采用混合仿生鱼眼-复眼结构,实现了大视场兼具高分辨率的光学成像系统设计。前级物镜系统为大直径球透镜,收集广角目标光线并成像到与球透镜同心的球面上中继像面上;次级目镜系统是关于球透镜中心球对称的小口径透镜组阵列,对中继像进行像差校正并成像到探测器阵列上。对比了物镜采用双层同心球和单个球透镜的成像性能,后者可获得更优的成像性能且避免了双胶合球透镜带来的公差控制及力学与热稳定性问题。整个成像系统的视场大于 100° ,全视场内角分辨率优于 $10''$,而畸变小于 5%;系统具有大景深特点,不需调焦即可同时对 300 m 到无穷远目标清晰成像,可广泛应用于侦查监控等领域。

关键词:光学设计;仿生设计;广角;多尺度成像

中图分类号:TN202;O439

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0205002

Biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system with wide view and high resolution

LU Wenwen, CHEN Shanyong, ZHAI Dede, XIONG Yupeng

(College of Intelligence Science, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:Based on the multiscale imaging theory, a biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system is utilized for wide view and high resolution sensing. The objective is a relatively large-aperture ball lens collecting the wide-angle target light and imaging it onto an intermediate image surface which is spherical and concentric with the ball lens. The intermediate images are then corrected for aberration and imaged onto the detector array by a small-diameter lens group array which work as the eyepiece and are spherically symmetric about the center of the ball lens. A comparison of imaging performance is presented between the system using concentric double ball lenses and the system using single ball lens as the objective, respectively. The latter has even better imaging performance and avoids the problems of tolerancing, mechanical and thermal instability of the cemented ball lenses. The designed full field of view is over 100° while the angular resolution is higher than $10''$ and the distortion is less than 5% in the full field. The system has a large depth of field. Targets from 300 m away to infinite can be simultaneously imaged without focus adjustment. It can be widely used in the field of surveillance.

Key words:optical design; biomimetic design; wide field of view; multiscale imaging

引言

鱼眼和复眼是自然界两种典型的广角成像系统。仿生鱼眼镜头是利用鱼眼广角成像原理设计的短焦距镜头,视场可超过 180° ^[1],缺点是镜组复杂,畸变大且分辨率不高,特别是边缘视场的变形

非常明显,多用于视频监控。与高等动物的单眼不一样,昆虫的视觉由复眼产生。复眼系统由许多小眼构成,例如蜻蜓每只复眼有 28 000 个小眼。这些小眼排列成球面上的阵列,以获得接近 240° 的大视场。但是小眼直径一般为 $15 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$,

其承担的局部视场仅有几度,分辨能力比人眼低,视力仅 1 m 左右^[2]。

事实上,大视场和高分辨率是成像系统设计的一对根本矛盾^[3-6],究其根本在于系统的空间带宽积(space-bandwidth product, SBP)受限,SBP 可解释为像平面上能够解析的点数^[7-8]。提高 SBP 意味着随着成像系统尺度的增大,系统复杂性也迅速增加,以平衡几何像差的影响,达到或接近衍射受限条件。成像系统设计遵循基本的比例缩放规律,即焦距、口径及其他长度量纲的参数增大 M 倍,横轴像差与波像差随之同比例增大,而所有角度、曲率参数保持不变。多尺度成像原理正是根据比例缩放规律,采用两级或多级成像,在大视场与小像差之间取得平衡。美国杜克大学 Brady 研究小组首先提出多尺度设计的概念^[8],将成像系统分为物镜透镜组和后端小相机阵列两部分,并先后公开了系列十亿像素级相机的多尺度设计结果^[3,10-14]。

从仿生学的角度看,这种多尺度设计是混合了鱼眼-复眼的仿生结构。前级为仿生鱼眼的物镜设计,其尺度与集光率及角分辨率指标匹配,且像面为同心球面,而不必是传统镜头所要求的平面;次级为仿生复眼的小型目镜阵列,排列成球面形状,将物镜成像中继到各个目镜的像平面探测器阵列上。目镜阵列因口径较小,能很好地校正局部小视场的像差,并且制造成本不高,可以适当增加复杂性,实现接近衍射极限的高清成像。

1 物镜采用双层同心球透镜的成像系统

1.1 成像系统设计

参考十亿像素相机设计^[15],物镜结构为同心双胶合球透镜,设计波长为可见光(486.132 7 nm、587.561 8 nm 和 656.272 5 nm)。中心为整球,材料为成都光明的 K9 玻璃;与整球胶合的是 2 个半球窝透镜,外径为 129.6 mm,材料为成都光明的 F4 玻璃。该设计具有球对称性,对于次级小口径目镜来说像差都是相同的,因而可用完全相同的目镜阵列。目镜设计主要平衡球差和色差,基于双高斯镜头结构,材料为成都光明的低成本玻璃,口径约为 10 mm,以各面的曲率半径和光学间隙为优化变量进行优化。整个两级成像系统的光学设计如图 1 所示,相邻目镜的光轴夹角为 5°,全视场大于 $\pm 50^{\circ}$ 。

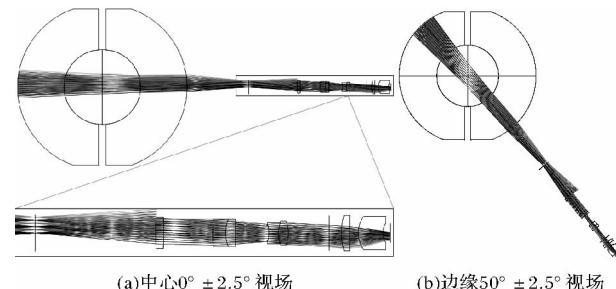
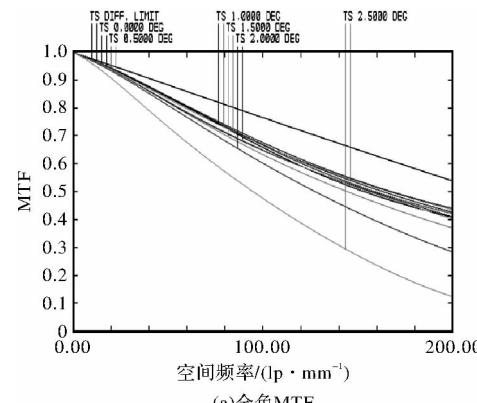


图 1 双层同心球透镜作为物镜的成像系统设计

Fig. 1 Imaging system design using concentric double ball lenses as objective

系统孔径光阑的直径为 4.38 mm,设在目镜组中第 2 个双胶合透镜前。系统主要参数如下:有效焦距 $f=52.667 6$ mm,总长 $L=286.062 2$ mm,像方光圈数 $F=3.2$,入瞳孔径 EPD=16.458 4 mm。在中间波长 $\lambda=587.56$ nm 下按照望远系统计算角分辨率 $\delta=43.55 \mu\text{rad}$ ($9.0''$)。选用 MT9J003 CMOS 探测器,静态模式像面尺寸为 $6.119 \text{ mm} \times 4.589 \text{ mm}$,像素数 3664×2748 ,像素尺寸 $1.67 \mu\text{m} \times 1.67 \mu\text{m}$,对应 CMOS 满视场为 $\pm (3.32^\circ \times 2.49^\circ)$ 。

由于目镜阵列是关于物镜球心对称的,每个目镜的成像性能即代表了全视场的成像性能。图 2(a)为单路目镜对无穷远目标成像的 $0 \sim 2.5^\circ$ 视场全色调制传递函数(modulation transfer function, MTF)曲线,土 2° 视场内在 200 lp/mm 频率处的 MTF 均大于或接近 0.3,具有很好的像质。因图像拼接要求视场重叠(渐晕), 2.5° 视场的子午 MTF 下降较明显。图 2(b)是畸变,在边缘视场 2.5° 的畸变小于 3%。另一方面,将物距从无穷远依次调整为 5 km 和 300 m,发现无需调焦,MTF 和弥散斑变化很小,说明系统具有很大的景深,可同时在 300 m 至无穷远目标较好成像。进一步,将物距改为 20 m,通过像面位置调整(约 0.14 mm),也可以得到很好的 MTF,说明系统适当调焦后也可用于近距离目标成像。



(a) 全色 MTF

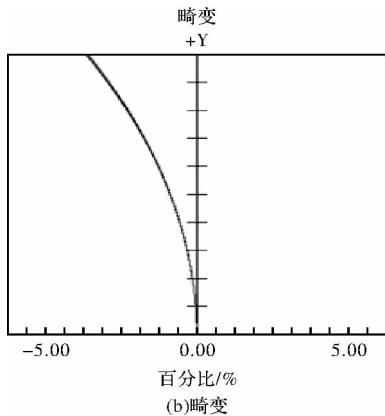


图 2 双层同心球透镜作为物镜的系统成像性能
Fig. 2 Imaging performance using concentric double ball lenses as objective

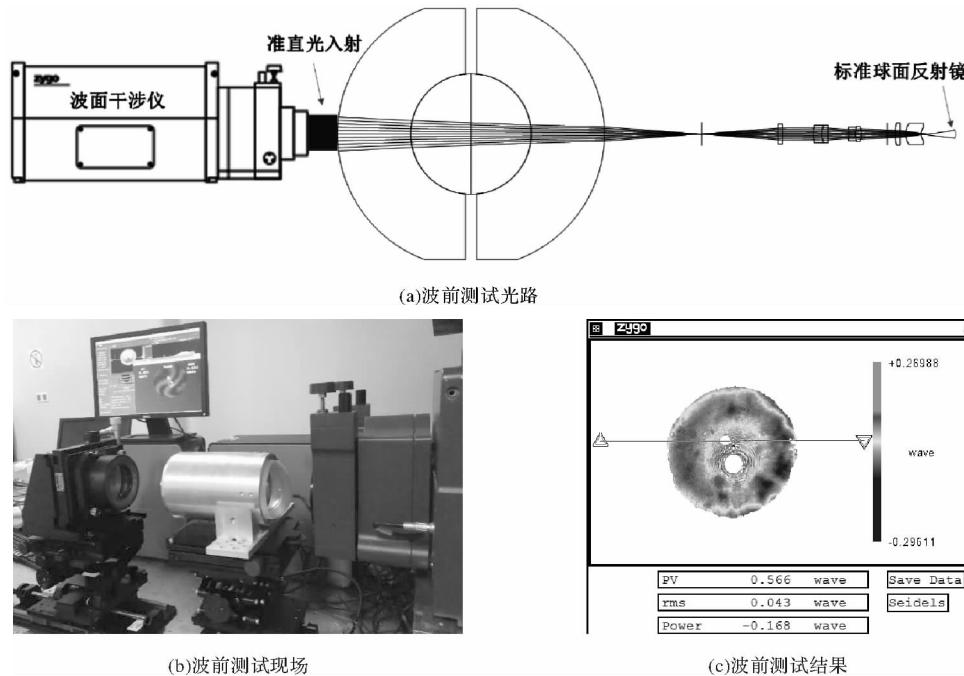


图 3 成像系统的波前误差测试

Fig. 3 Wavefront error measurement of imaging system

图 4(a)是成像系统获取的 3 km 距离目标图像,其中近处距离约 100 m 的树枝树叶清晰可见,远处嘉熙中心大楼距离约 3 km,局部放大后如图 4(b)所示,大楼顶部“JIAXI CENTER”字样清晰可见(裸眼不可见),说明相机具有大景深特点。

图 5(a)是获取的距离 7.4 km 的顺天国际金融中心图像,局部放大图像如图 5(b),“顺天 IFC”、“中国铁建”等字样清晰可见,玻璃窗格、塔吊桁架甚至楼顶避雷针等细长目标也清晰可辨。

图 6(a)、6(b)为距离 20 m 和 40 m 的 USAF-1951 分辨率板所成的像,据此估算系统的角分辨

1.2 成像性能测试

将物镜和单路目镜的两级成像系统组装在一起后,首先采用波面干涉仪测量系统波像差。测量原理如图 3(a)所示,波面干涉仪发出准直光入射到物镜上,在像平面处聚焦于一点;与该点共焦放置一个标准球面反射镜,可将测试光束原路返回并最终回到干涉仪,与干涉仪镜头参考面形成干涉,干涉图反映了系统波前误差的大小。图 3(b)是测量现场照片,图 3(c)是波前误差测量结果,由于中心存在反射鬼像,PV 值受噪声点影响较明显,RMS 值为 0.043λ ,满足 Maréchal 判据,即可认为系统成像接近衍射极限。

率为 $8'' \sim 10''$,与系统对无穷远目标成像的分辨率设计指标相当。



(a)单路目镜获取的图像

(b)局部放大图像

图 4 距离 3 km 目标图像

Fig. 4 Image of buildings 3 km far away



(a)单路目镜获取的图像

(b)局部放大图像

图 5 距离 7.4 km 目标图像

Fig. 5 Image of buildings 7.4 km far away



(a)距离 20 m

(b)距离 40 m

图 6 USAF-1951 分辨率板成像

Fig. 6 Images of USAF-1951 resolution test target

2 物镜采用单个球透镜的成像系统设计

采用双层同心球透镜形式的物镜,要求半球碗与被包覆的中心球的曲率半径相等,2个透镜材料的热膨胀系数以及折射率必须匹配,使得可选材料受限,力学稳定性和热稳定性较差,且制造成本较高,还存在胶合偏心的影响。尽管物镜采用多层同心球的形式确实能够得到更好的中继像质^[6],由于次级目镜系统具有很强的像差校正能力,为了简化物镜系统,完全可用单个球透镜形式,其剩余像差通过优化目镜系统进行校正。因此尝试物镜采用直径 129.6 mm 单一球透镜结构,玻璃材料选用 K9。小口径的目镜组设计仍然基于双高斯镜头结构,包括依次布置的双凸透镜、2个双胶合透镜、调焦镜组以及焦平面探测器。为降低成本,目镜组所有透镜均为平面或球面透镜。通过优化曲率半径、光学间隙等参数,得到设计结果如图 7 所示。

同样由于球对称性,各目镜完全相同,只需考察单路目镜对局部小视场的像差校正能力。系统主要参数:有效焦距 $f = 50.3798 \text{ mm}$, 总长 $L = 264.725 \text{ mm}$, 像方光圈数 $F = 2.974$, 入瞳孔径 $\text{EPD} = 16.9394 \text{ mm}$ 。图 8(a)所示为系统在无穷远物距、 $0\sim3.5^\circ$ 视场下的单路目镜成像的全色 MTF, 图 8(b)是畸变,在边缘视场 3.5° 的畸变约为 4.5% 。调整物距,发现该系统同样具有大景深特点。

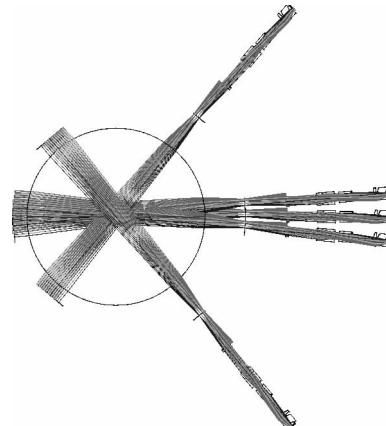


图 7 单个球透镜作为物镜的成像系统设计

Fig. 7 Imaging system design using single ball lens as objective

图 8 与图 2 对比可见采用单个球透镜物镜的成像系统通过目镜的像差校正,甚至成像性能比双层同心球透镜物镜的成像系统更优;局部小视场可达到 $\pm 3.5^\circ$,从而可满视场成像且相邻目镜的重叠视场更大,镜筒之间的间隔也可以更大,有利于光机设计; $\pm 2^\circ$ 视场内在 200 lp/mm 频率处的 MTF 均大于或接近 0.3,子午面内的边缘视场 $\pm 3.5^\circ$ 处 MTF 仍然大于 0.1。

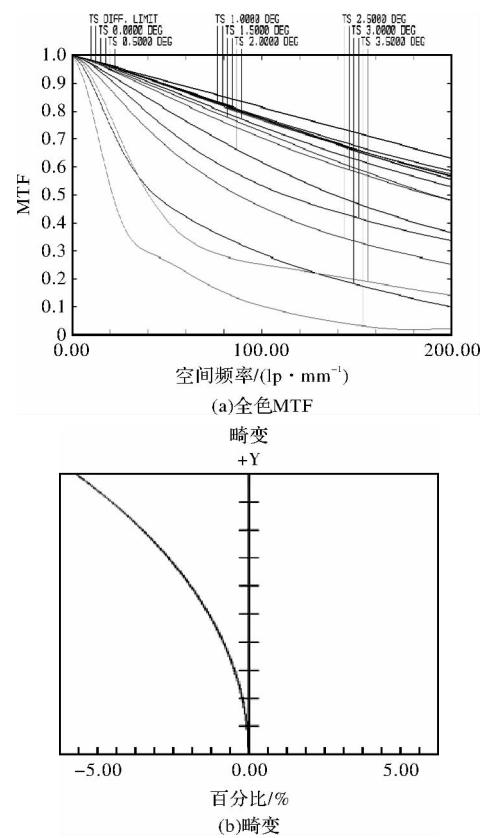


图 8 单个球透镜作为物镜的系统成像性能

Fig. 8 Imaging performance using single ball lens as objective

图9是该系统的光机设计,采用免装调物镜镜筒结构,前端与球透镜配合,后端球冠曲率中心与球透镜中心重合,球冠上布满阵列孔,用于装配目镜阵列。该系统正在进行透镜和镜筒的加工,从光学设计结果对比看,有望获得优于图4~图6的成像质量,后续将进行广角目标成像实验,完成阵列图像获取与拼接。



图9 单个球透镜作为物镜的成像系统光机设计

Fig. 9 Optomechanical design of imaging system using single ball lens as objective

3 结论

混合仿生的两级成像系统很好地解决了大视场与高分辨率的矛盾,其中物镜采用仿生鱼眼的球透镜结构,增大入瞳孔径收集广角目标光线;目镜采用仿生复眼结构,通过小口径透镜组阵列进行像差校正实现近衍射极限成像。设计结果表明,物镜采用单个球透镜也可以获得与双层同心球透镜相当甚至更优的成像性能,从而避免双胶合球透镜带来的公差控制和力学及热稳定性问题。系统可在100°全视场内达到角分辨率优于10'',畸变小于5%的指标,应用于侦查监控等领域,可实现广角目标的高清成像。

参考文献:

- [1] LI Weishan, SHAN Hong, GAO Jinzhao, et al. Design of universal digital fish-eye lens testing system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2): 169-173.
李维善,单宏,高今朝,等.通用型数字鱼眼镜头检测系统的设计[J].应用光学,2018,39(2):169-173.
- [2] LEE L P, SZEMERÉDI R. Inspirations from biological optics for advanced photonic systems [J]. Science, 2005, 310(5751): 1148-1150.
- [3] MARKS D L, SON H S, KIM J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 083202-1-12.
- [4] ZHU Haibin, SHAO Yu, ZHANG Yuanjian, et al. Optical system design of visible/infrared and double-FOV panoramic aerial camera [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 7-11.
朱海滨,邵毓,张远健,等.可见光/红外双视场全景式航空侦查相机光学系统设计[J].应用光学,2017,38(1):7-11.
- [5] SUN Chongshang, DING Yalin, WANG Dejiang. Advances in studies of wide-field high-resolution camera based on computational imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(03): 44-51.
孙崇尚,丁亚林,王德江.基于计算成像的宽视场高分辨率相机研究进展[J].激光与光电子进展,2013,50(03):44-51.
- [6] 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): 54-63.
- [7] LOHMANN AW. Scaling laws for lens systems [J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 4996-4998.
- [8] COSSAIRT O S, MIAU D, NAYAR S K. Scaling law for computational imaging using spherical optics [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(12): 2540-2553.
- [9] BRADY D J, HAGEN N. Multiscale lens design [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10661-10663.
- [10] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. Nature, 2012, 486: 386-389.
- [11] 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.
- [12] LLULL P, BANGE L, PHILLIPS Z, et al. Characterization of the AWARE 40 wide-field-of-view visible imager [J]. Optica, 2012, 2(12): 1066-1069.
- [13] 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.
- [14] MARKS D L, BRADY D J. Wide-field astronomical multiscale cameras [J]. The Astronomical Journal, 2013, 145: 128-143.
- [15] STAMENOV I, AGUROK I P, FORD J E. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs [J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7648-7661.