

外视场拼接的单镜头大视场中波红外成像系统的实现

单秋莎^{1,2}, 苏秀琴¹, 段晶^{1,2}, 周亮¹, 刘凯¹, 闫佩佩¹, 姜凯¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于外视场拼接原理, 研制一套大视场中波红外原理样机。设计一制冷型中波红外光学系统。采用光学系统出瞳与冷屏重合的二次成像结构形式, 保证系统具有 100% 冷光阑效率。工作波段为 3.7~4.8 μm , 焦距为 40 mm, 相对孔径为 1:2, 全视场角为 $21.74^\circ \times 17.46^\circ (27.88^\circ)$, 系统总长 145 mm。采用孔/反射镜分时成像的外视场拼接, 实现 2 \times 1 视场扩展。设计结果表明: 在空间频率 21 lp/mm 处, 轴外视场 MTF>0.68, 接近衍射极限。系统结构紧凑, 成像质量较高。利用原理样机完成可行性和合理性验证。

关键词: 分时曝光; 外视场拼接; 视场扩展

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0314002

Realized large field of view infrared imaging system of single lens with external field splicing

Shan Qiusha^{1,2}, Su Xiuqin¹, Duan Jing^{1,2}, Zhou Liang¹, Liu Kai¹, Yan Peipei¹, Jiang Kai¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the principle of external field splicing, a principle prototype of large-field mid-wave infrared was developed. A cooled mid-wave infrared optical system was designed. The secondary imaging structure of the optical exit aperture coincides with the cold screen was adopted to make sure 100% cold shielding efficiency of the system. The working wave band was 3.7-4.8 μm , the focus was 40 mm, the relative aperture was 1:2, the full field of view was $21.74^\circ \times 17.46^\circ (27.88^\circ)$, the total length of the system was 145 mm. The principle of external field splicing with time-sharing exposure imaging of holes/mirrors was adopted, 2 \times 1 field of view expansion was realized. The design result show that MTF>0.68 of the off-axis field of view at spatial frequency of 21 lp/mm, which closes to the diffraction limited. The system has compact constructure and has high imaging quality. The feasibility and rationality of the splicing principle were verified using prototype .

Key words: time-sharing exposure; external field splicing; field of view expansion

收稿日期:2019-11-05; 修订日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金(61805275);中国科学院"西部之光"人才培养引进计划(XAB2017B27)

作者简介:单秋莎(1986-),女,博士,主要研究方向为光学系统设计和超分辨成像。Email:shqsh.2007@163.com

0 引言

高速摄影技术在交通、航空、航天等军用、民用领域均有很广泛的应用,尤其是对大视场目标高速测量时,被测目标速度快、目标多、所占的视场范围大,受限于探测器的尺寸,单台的高速摄像机已不能拍摄到完整的画面,探测器的尺寸成为限制相机视场的主要因素。视场拼接技术是解决大视场问题的一个热点。目前的视场拼接方案分为像方拼接(内拼接)和物方拼接(外拼接)两种。

像方拼接(内拼接)是在像面处用多个探测器进行拼接,可以直接拼接,也可以通过光学元件进行光学拼接^[1-2],将多片探测器按照一定排列方式拼连成一个完整的大接收靶面,参考文献[3]提出了采用反射棱镜分光的光学拼接方式,棱镜将像面分割成4个,并分别对应4个探测器,结构紧凑,无运动部件,但要求光学系统有较长的后截距,以满足反射棱镜的布局需求,而且能量利用率降低,系统横向尺寸较大。在红外波段内,制冷型探测器其焦平面封装在杜瓦瓶内,因此,焦平面直接拼接的方法不适合,而且探测器自身有一定的长度,若采用棱镜分光拼接或者反射镜分时指向的拼接方法,需增大后截距,拉长结构。

物方拼接(外拼接)是在成像物空间实现对观测区域的拼接,将多个相机按照不同的拼接角度和相对位置进行一定组合,获得大视场图像^[4],每个镜头都对应一个探测器,比如“横1”、“纵1”、“田”字和“T”型等。参考文献[5]提出了由4个测量相机以“田”字型拼接实现大视场测量的方案,布局简单,但需要多个光学参数一致的相机,并存在着视差,给视场拼接带来误差。对于红外波段而言,制冷型红外探测器造价昂贵,加工成本增加。

文中提出一种外置反射镜的物方拼接(外拼接)方式,以单镜头多反射镜的方法实现视场扩展。于光学镜头前依次放置多孔旋转反射镜和平面反射镜,利用孔/反射镜的切换获得不同观测区域的图像,以牺牲成像帧频的方法获得大视场图像。该方法结构紧凑简单,能量利用率较高,适用性高,既可适用于可见光波段,也可适用于红外波段。

1 外视场拼接原理

外视场拼接方式的基本思路是利用孔和反射镜

分时曝光进行视场分割,多个反射镜对一个成像镜头,实现不同观测区域的凝视成像。通过控制多孔旋转反射镜的转动,将不同观测区域分时曝光在探测器靶面上,从而达到扩大系统视场的目的。

以两光路为例说明外视场拼接的原理,光学系统前依次放置多孔旋转反射镜和反射镜,如图1所示。多孔旋转反射镜上交替均布孔和反射镜,如图2所示。当多孔旋转反射镜在光路中为孔时,光路1曝光;当多孔旋转反射镜在光路中为反射镜时,光路2曝光;从而实现光路1和光路2交替曝光。

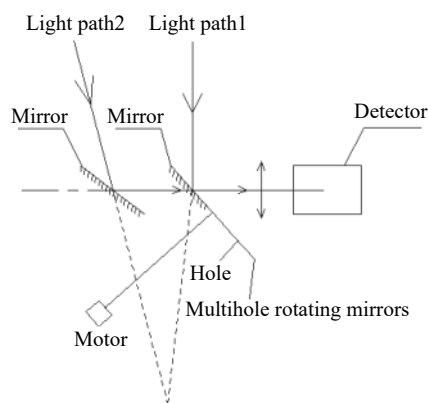


图1 系统工作原理示意图

Fig.1 Diagram of system principle

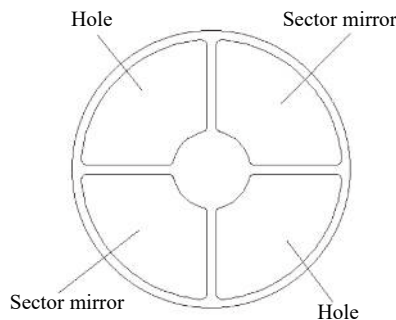


图2 多孔旋转反射镜的布局图

Fig.2 Layout of porous rotating mirror

此种外拼接方式存在视觉盲区或视场重叠的现象,如图3所示。光路1的主光轴与光路2的主光轴成一定夹角 θ , $\theta \geq 2\omega$ 时,两交汇视场会产生视觉盲区(即漏测),造成观测区域遗漏,如图3(a)所示; $\theta < 2\omega$ 时,两交汇视场存在视场重叠现象,浪费视场资源,如图3(b)所示。通过调整两光轴的夹角 θ 和两反射镜的轴向间隔,即可避免上述现象。通过控制反射镜和多孔旋转反射镜的交替成像,从而达到扩大视场的目的,该方法的拼接效果将在文中第3部分内容中体现。

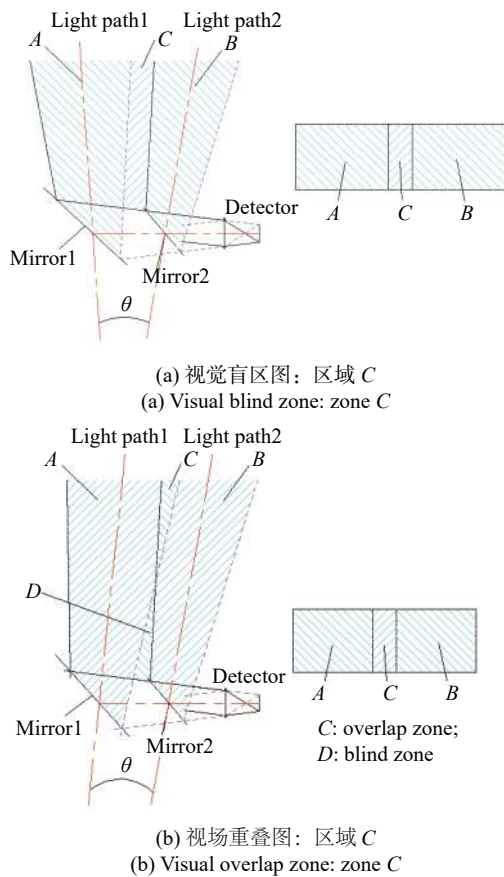


图 3 外视场拼接示意图

Fig.3 Diagram of external field splicing

2 设计实例

2.1 系统指标要求

该红外系统采用中波 640×512 制冷型焦平面阵列探测器, 其像元尺寸为 24 μm×24 μm, 红外光学系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 光学系统的基本参数

Tab.1 Basic parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength/μm	3.7-4.8
Aperture/mm	20
Focal length/mm	40
F number	2
Full field of view	21.74°×17.46°(27.88°)

2.2 光学系统设计

为保证红外系统具有 100% 冷光阑效率, 即探测器的冷屏与系统的出瞳重合。由基本参数可知, 该系统具有中等焦距、中等视场、大相对孔径的结构特

点, 采用二次成像的折射式结构形式, 以提高系统的孔径利用率。

相对孔径较大的红外系统存在着多种高级像差, 视场较大的系统轴外像差(彗差、像散、场曲、倍率色差、畸变)需要进行校正。通过 Si、Ge 两种材料的搭配以校正色差, 并采用非球面来校正大相对孔径引起的球差、彗差与控制畸变, 可有效校正和平衡初级及高级像差^[6-10]。

利用光学设计仿真软件 CodeV 对初始结构进行优化, 将光学结构复杂化, 并将 3 个 Ge 材料的表面非球面化, 以达到平衡像差的目的, 最终优化结果如图 4 所示, 系统由 8 片透镜组成, 其中 3 个表面为高次非球面, 透镜材料为 Ge 和 Si, 系统采用二次成像设计, 压缩第一片透镜的口径, 总长 145 mm, 结构紧凑, 系统结构参数如表 2 所示。

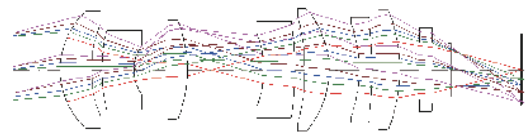


图 4 中波红外光学系统结构图

Fig.4 Structure diagram of mid-wave infrared optical system

表 2 系统结构参数表

Tab.2 System structure parameters

Serial number	Radius	Thickness	Surface type	Glass
1	24.595	9.72	Sphere	Si
2	39.335	3.36	Sphere	
3	56.817	10	Sphere	Ge
4	14.881	10.49	Asphere	
5	1 620.865	6.17	Sphere	Si
6	-40.232	23.58	Sphere	
7	-54.727	9.86	Asphere	Ge
8	-102.979	3.19	Sphere	
9	-63.085	7.54	Sphere	Si
10	-28.932	9.79	Sphere	
11	-43.21	4	Sphere	Ge
12	-134.589	2	Asphere	
13	1 051.776	6.66	Sphere	Si
14	-49.914	5.9	Sphere	
15	302.679	4	Sphere	Ge
16	Infinity	5	Sphere	

设计完成的中波红外光学系统的像质接近衍射极限, 系统 MTF 和点列图分别如图 5、图 6 所示, 系

统在奈奎斯特频率 (21 lp/mm) 处轴外视场的 $MTF > 0.69$, 边缘视场的弥散斑的均方根值 (RMS) 为 $3.3 \mu\text{m}$, 小于爱里斑直径 ($39.04 \mu\text{m}$), 具有较好的成像质量。

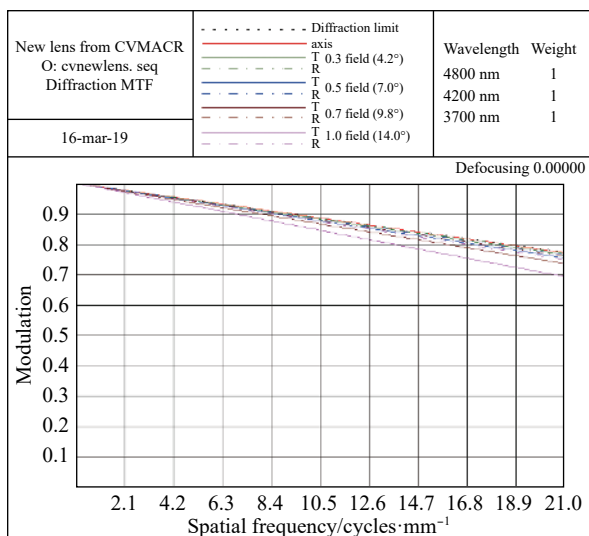


图 5 MTF 曲线图

Fig.5 MTF curve diagram

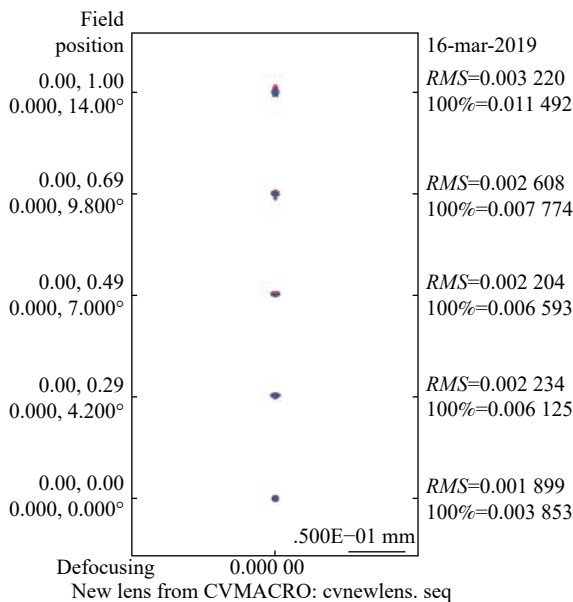


图 6 系统点列图

Fig.6 System spot diagram

3 试验验证

基于外视场拼接原理, 于系统前依次放置多孔旋转反射镜和平面反射镜, 利用单镜头实现 2×1 的视场扩大。为有效利用光学系统的视场资源, 采用两视场边缘光线平行的方式 ($\theta = 2\omega$) 进行拼接, 在保证各自的机械支撑结构的同时, 尽量缩短两平行光线的间

隔, 减小视场盲区。

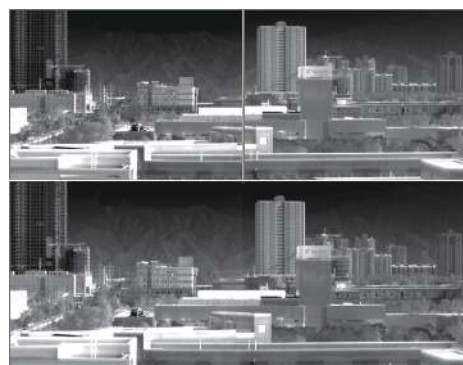
根据中波红外系统的视场角确定平面反射镜的放置角度及位置、多孔旋转反射镜的放置角度及位置、多孔旋转反射镜中的扇形反射镜和平面反射镜的尺寸, 即要保证其中波红外系统的视场不被遮挡, 又要避免因扇形反射镜的有效反射区域过大而造成的鬼像。合理控制曝光位置, 以达到和孔/反射镜曝光同步。

将原理样机对着室外进行成像, 实物图如图 7 所示, 其采集图像如图 8 所示, 图 8(a)、(b) 的左右图像为对应不同视场下的拍摄图形, 下图为拼接图像, 由拼接图像可看出拼接处过渡平滑, 无缝衔接, 既不存在视场重叠^[1], 也没有出现视场盲区。



图 7 原理样机实物图

Fig.7 Principle prototype physical map



(a) 观测区域 1
(a) Observation zone 1



(b) 观测区域 2
(b) Observation zone 2

图 8 原理样机采集的拼接图像

Fig.8 Splicing image acquired by the principle prototype

和其他物方拼接相比,如“横 1”,利用 2 个镜头对应 2 个探测器,每个相机按照一定的角度实现 2×1 的视场拼接,如图 9 所示。采用“横 1”拼接方式也可得到如图 8 的拼接效果。

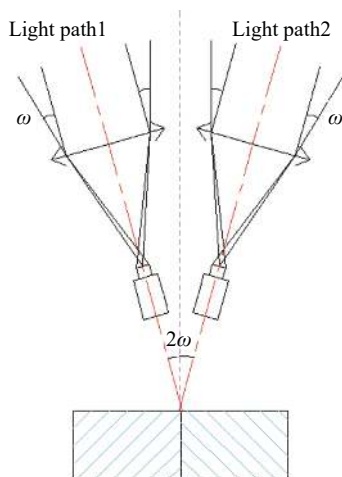


图 9 “横 1”拼接示意图

Fig.9 Splicing diagram of “cross 1”

两种拼接方式的对比分析如表 3 所示。由表 3 分析可知,前置多孔旋转反射镜和反射镜的拼接方式具有一定的优势,拼接方式简单,成本低。

表 3 两种拼接方式的对比分析

Tab.3 Comparative analysis of two splicing methods

Object space splice	Advantages	Disadvantages	Same points
"Cross 1"	No loss of frame frequency, no motion mechanism	Two optical systems, two thermal imagers, two processing systems; relatively complex structure	Exist of blind areas or overlapping field of view
Front rotating mirror and mirror	One optical system, one thermal imager, one processing system; simple splicing	Loss of frame frequency, need motion mechanism	

4 结 论

文中提出了一种基于孔和反射镜分时曝光的外视场拼接方式,利用不同位置和不同角度的反射镜分割视场,实现了不同观测区域的凝视成像。此种拼接方式简单,对红外光学系统的设计不需要提出附加的设计要求,为物方视场拼接提供了一种新思路。

为了验证该拼接方式的工程可行性和合理性,设

计并搭建原理样机,根据中波红外系统的视场大小,确定多孔旋转反射镜的反射镜/孔尺寸、放置角度和位置、平面反射镜的尺寸、放置角度和位置。将采集到的 2 个图像拼接成 1 幅,拼接图像无缝拼接,利用单镜头获得 $43.48^\circ \times 17.46^\circ$ 大视场图像。此种拼接方式还可以进行视场扩展,比如,将上述 2×1 光路系统分布为上下两层,实现 4×4 的视场拼接。

参考文献:

- [1] Meng Qinghua. Optical assembly of area array CCD focal plane for ballistic camera [J]. *OME Information*, 2011, 28(7): 46-49. (in Chinese)
孟庆华. 弹道相机面阵 CCD 焦平面的光学拼接[J]. *光机电信息*, 2011, 28(7): 46-49.
- [2] Zhang Xiang, Gao Yunguo. Imaging analysis and control design of large field of view stitching system with a single lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0118001. (in Chinese)
张祥, 高云国. 单镜头大视场拼接系统成像分析与控制设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0118001.
- [3] Lei Hua. Research on an seamless optical butting technology based on pyramid reflector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.(in Chinese)
雷华. 基于金字塔反射镜的视场无缝拼接技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [4] Yang Libao, Li Yanhong, Wang Jing, et al. Application of multi-lens image stitching to opto-electronic theodolites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1048-1053. (in Chinese)
杨立保, 李艳红, 王晶, 等. 多镜头成像拼接方法在经纬仪系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1048-1053.
- [5] Wang Min, Song Liwei, Qiao Yanfeng, et al. External field stitching technology for high speed target measuring and its implementation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2069-2076. (in Chinese)
王旻, 宋立维, 乔彦峰, 等. 外视场拼接测量技术及其实现[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2069-2076.
- [6] Gao Ming, Xu Huangrong, Liu Jun, et al. Design of diffractive-refractive dual-band co-path parfocal optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0513003. (in Chinese)
高明, 许黄荣, 刘钧, 等. 折/衍射双波段供光路器焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0513003.
- [7] Chen Lvji, Li Ping, Feng Shengrong, et al. Athermal design for MW infrared dual Field-of-View optical system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(1): 1-8. (in Chinese)

- 陈吕吉, 李萍, 冯生荣, 等. 中波红外消热差双视场光学系统设计[J]. *红外技术*, 2011, 33(1): 1–8.
- [8] Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. MWIR zoom optical system with large zoom range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 663–668. (in Chinese)
- 周昊, 刘英, 孙强. 高变焦比中波红外连续变焦光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 663–668.
- [9] Dong Keyan, Wang Jian, Sun Qiang, et al. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system [J]. *China Optics*, 2012, 5(6): 596–601. (in Chinese)
- 董科研, 王健, 孙强, 等. 机载双视场中波红外光学优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(6): 596–601.
- [10] Sun Chiquan, Zhao Kan, Meng Junhe, et al. IR optical system design of roll-elevation seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0204005. (in Chinese)
- 孙赤全, 赵侃, 孟军合, 等. 滚仰式导引头红外光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0204005.
- [11] Zhao Huijie, Chen Ke, Jia Guorui, et al. FOV stitching method for hyperspectral image with tangent correction of panoramic distortion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303005. (in Chinese)
- 赵慧洁, 陈轲, 贾国瑞, 等. 全景畸变正切改正的高光谱影像视场拼接方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0303005.