

仿鹰眼大视场高分辨智能成像系统研究

刘鹏, 丁红杰, 张旺*

吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025

摘要 由于鹰眼的特殊视觉机制, 其具有大视场搜索、远距离探测和高分辨率成像等优点。基于鹰眼视觉原理, 针对弹载光电探测平台, 探索一种可以在大视场范围进行目标搜索, 同时在关键区域进行目标自动定位和高分辨率成像的智能探测方法。在长波红外谱段, 设计了五孔径大视场高分辨成像系统。基于 Agent 智能控制理论, 提出了多传感器智能协同控制方案, 实现大视场范围下的目标自动定位。研究了多孔径图像拼接和变分辨率图像融合方法, 实现了大视场背景图像和高分辨目标图像的整体获取。研究结果表明, 设计的多孔径探测系统可有效解决弹载环境下远场探测过程中大视场与高分辨的矛盾问题。

关键词 探测器; 光电系统; 大视场; 高分辨; 智能控制

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0404001

High-Resolution Intelligent Imaging System with Wide Field of View Based on Eagle Eye

Liu Peng, Ding Hongjie, Zhang Wang*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China

Abstract Because of its special visual mechanism, eagle eye has several advantages, such as a wide field of view, remote detection, and high-resolution imaging. In this paper, based on the eagle-eye vision, an innovative and intelligent detection method is presented that can automatically search for specific targets in key areas and create high-resolution images aimed at being part of a missile-borne optical-electric detection platform. In the long-wave infrared spectrum, a high-resolution imaging system is designed with five apertures. Based on the Agent intelligent control theory, a multisensor collaborative control scheme is established to realize automatic target positioning in a wide field of view. The multi-aperture image mosaic and variable resolution image fusion methods are studied to achieve the overall acquisition of large field of view background and high-resolution target images. Results show that our multi-aperture detection system can effectively solve the contradiction between large field of view and high-resolution in the far-field detection under an optical dome environment.

Key words detectors; optical-electric system; large field of view; high resolution; intelligent control

1 引言

鹰眼具有特殊的视觉机制, 结构上可分为正中央凹区域和侧中央凹区域。侧中央凹具有较大的视野并且通过左右两侧中央凹相互交叠构成了更

大的视野范围。而鹰眼的正中央凹分布更多的感光细胞, 能够更敏锐地发现视野里的物体。特殊的视觉机构决定了鹰可以进行远距离大视场搜索和关键区域高分辨率成像, 成为高空侦查、航空探测系统的理想模仿对象。从等效光学系统角度来考虑,

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-03-12; 录用日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61675002)

通信作者: *wangzhang@jlu.edu.cn

鹰眼系统可以视为多个子系统的集成,包括了大视场搜索系统和目标高分辨成像系统。多孔径成像系统相比传统的单一孔径成像系统集成多个子系统的优势,有效地扩大了视场范围,提高了关键区域分辨率。对于高空制导武器,如空对地导弹、精确制导炸弹、弹道导弹再入段,由于弹目距离远,单一孔径系统无法兼顾时间分辨率和空间分辨率,导致目标易丢失或脱靶。基于鹰眼视觉机制,采用多孔径成像方式设计导引头光学系统,使弹载光学系统兼顾大视场与高分辨成像,同时避免使用万向架、多轴转台等复杂机械装置,从而进一步提高了系统的稳定性。各国针对鹰眼的特殊视觉机制已开始将其应用于远距离探测制导系统中。美英两国已经开展了对基于鹰眼导弹视觉系统的研究并且研制了可见光波段的鹰眼导弹,有效地提高了导弹的探测范围和视敏度^[1]。在国内,南京航空航天大学根据鹰眼的视觉机制对巡航导弹制导与控制技术进行了研究,提出了基于仿鹰眼视觉原理的巡航导弹成像制导的理论框架^[2]。北京航空航天大学开发出了一套仿鹰眼视觉成像制导环境平台,成功地将仿鹰眼视觉技术应用到了制导仿真平台中^[3]。西北工业大学开展了关于蟹复眼、蝇复眼和人眼仿生视觉在成像制导中应用的基础研究工作,重点研究了这三种视觉系统的视觉机制在红外成像制导中的应用,他们的工作也对本文基于鹰眼视觉的研究提供了借鉴^[4]。

针对现阶段弹载仿鹰眼光学系统研究的不足,本文基于鹰眼视觉机制设计了一个同时具有大视场、高分辨的弹载多孔径红外光学系统,力求解决远距离大视场高分辨探测和目标自主定位与识别的问题。设计结果表明,所设计系统的各项性能指标和结构的可实现性均满足要求。

2 仿鹰眼多孔径光学系统设计

2.1 传感器选择

通过对探测目标的红外特性分析,选取波长为 8~12 μm 的长波红外谱段作为光学系统工作波段。考虑到红外系统的灵敏度、分辨率和信噪比等因素,选取的红外探测器红外像元尺寸为 15 μm × 15 μm ,像元数为 1024 × 768;考虑到弹载光学系统小型化设计要求,子孔径系统 F 数需要尽可能小,因此多孔径系统中边缘子孔径 F 数选择为 1,中央子孔径 F 数选择为 3,探测器相同情况下,中央子孔径分辨能力为边缘子孔径的 3 倍。

2.2 入瞳直径

在进行导引头光学系统设计时,需要依据红外光学系统的辐射特性确定导引头光学系统的入瞳直径,而入瞳直径通常由导引头的作用距离得出。参考文献[10],导引头的作用距离和入瞳直径之间的关系为

$$R^2 = \frac{\delta \cdot |(L_t - L_{bg})/N_t| \cdot A_t \cdot A_0 \cdot \tau_a \cdot \tau_0 \cdot D^*}{(A_d/2t_{int})^{1/2} \cdot R_{SN}}, \quad (1)$$

式中: R 为红外光学系统作用距离; δ 为信号提取因子; L_t 为目标辐射亮度; L_{bg} 为背景辐射亮度; N_t 为目标在焦平面上占有的像元数目; A_t 为目标辐射面积, A_d 为探测器单个像元面积; τ_a 为大气透过率, τ_0 为光学系统透过率; t_{int} 为探测器积分时间; R_{SN} 为系统信噪比; D^* 为探测器比探测率。经计算得到,光学系统入瞳面积 $A_0 = 6.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。又因 $A_0 = \pi(D/2)^2$,解得入瞳直径 $D = 28.2 \text{ mm}$ 。在实际应用过程中,应考虑各参数所带来的偏差,所以设计时取入瞳直径 $D = 30 \text{ mm}$ 。

2.3 视场角

传感器沿水平方向和竖直方向的视场角分别为

$$\theta_h = 2\arctan \frac{n_h L}{2}, \quad (2)$$

$$\theta_v = 2\arctan \frac{n_v L}{2}, \quad (3)$$

式中: n_h 为传感器的列像元数; n_v 为传感器的行像元数; L 为像元尺寸。

经过计算得到,边缘传感器视场角为 $28^\circ \times 21^\circ$,中央传感器视场角为 $9^\circ \times 7^\circ$ 。

2.4 光学系统设计

仿鹰眼多孔径光学系统包括整流罩和 5 个子孔径光学系统。子孔径光学系统分别是四路边缘分布用于大视场拼接的子孔径光学系统,一路中央高分辨率光学系统,如图 1 所示。其中,边缘四路子孔径中的任意孔径与相邻孔径之间有 16% 视场重叠区域,用于拼接大视场,模仿鹰眼侧中央凹视觉结构。中央高分辨可

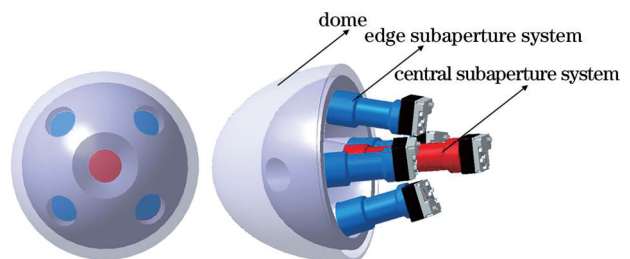


图 1 弹载多孔径光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of multi-aperture system in an optical dome

运动光学系统的光轴可以指向四孔径拼接大视场的任意位置,模仿鹰眼正中央凹区域进行高分辨率成像。

在子孔径系统设计过程中,需要考虑光学整流罩的位置和结构。中央高分辨率子孔径第一片透镜为孔径光阑,该孔径光阑中心与半球形整流罩球心重合。此外,高分辨率子孔径系统在转动过程中以球心为转动中心,因此该系统与整流罩同轴设计。设计结果如图 2(a)所示,系统由三片透镜组成,其中第一、三片透镜材料采用锗,第二片透镜材料采用硫化锌。边缘大视场系统分布于整流罩四周与整流罩离轴设计,边缘子孔径设计类似共形光

学系统设计,视场对应的整流罩为非规则面形,引入了较大的轴外像差。边缘子孔径系统设计结果如图 2(b)所示,系统由三片透镜组成。其中,第一、三片透镜材料采用锗,第二片透镜材料采用硫化锌。光学系统的成像质量一般用光学传递函数表示,它是经过傅里叶变换的点扩展函数,其模量部分称作调制传递函数(MTF)。多孔径光学系统中央高分辨子孔径和边缘子孔径系统的 MTF 分别如图 3(a)和图 3(b)所示。所设计多孔径系统应用于弹载光学平台,弹载光学系统技术参数指标如表 1 所示。

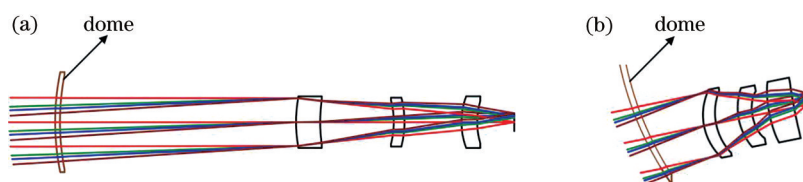


图 2 镜头结构设计图。(a)中央镜头结构设计图;(b)边缘镜头结构设计图

Fig. 2 Lens structure design drawing. (a) Design drawing of central lens structure; (b) design drawing of edge lens structure

3 基于 Agent 多传感器智能协同控制方案

为实现中央高分辨光学系统的智能控制,达到关键区域高分辨率成像的目的,需要边缘孔径和中心孔径协同工作。本文设计了 Agent 多传感器智能协同控制方案^[11-16]。在多传感器网络中,位于边缘的传感器有着对该覆盖空域内的探测和定位等任务。为了实现边缘传感器与中央传感器的协同探测,要对该传感器网络中的各个传感器进行时间同

步和资源统筹规划,对各传感器的能量资源、工作方式、波束方向、波束停留时间等进行合理的部署和调遣。多传感器协同控制网络如图 4 所示。

首先将对中央传感器和边缘传感器输入的信息进行时间同步和空间对齐,再经过数据关联进行协同位置预测和目标定位,最后进行波束调动与任务分配。在多传感器探测网络中,当边缘某一个传感器发现目标时,将目标所在位置信息传递给中央传感器,以驱动中央高分辨光学系统运动使光轴指向目标区域。中央传感器对目标的探测需要根据目标所在位置而发生改变,提升对目标的探测、识别和跟踪性能,以此来解决该光学系统的智能控制问题。Agent 概念首次出现在 1986 年,近些年随着人工智能的兴起,Agent 又迅速成为研究热点。Agent 是人工智能领域内的一个新兴技术,是一个具有自治能力的实体,这个实体可以在目标的驱动下通过环境的变化进行主动的反应,从而完成特定的任务。为实现多传感器任务分配与智能协同控制,将多智能体技术应用在多传感器网络中,即把多传感器网络中的每个传感器都看成一个智能体 Agent。单个边缘传感器 Agent 可以独立完成目标定位任务,又可以和中央传感器 Agent 进行协同工作。Agent 单元结构如图 5 所示。

Agent 单元之间通过通讯语言 KQML 来进行信息的传递及通过动作-条件机制进行动作的执行。

表 1 弹载光学系统技术指标

Table 1 Technical specifications of the missile-borne optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	8-12
Dome thickness / mm	3
Dome radius / mm	150
Material of dome	ZnS
Entrance pupil diameter of central system / mm	30
Entrance pupil diameter of edge system / mm	30
F number of central system	3
F number of edge system	1
Field of view of central system / ($^{\circ}$)	11
Field of view of edge system / ($^{\circ}$)	35
Field of view of system / ($^{\circ}$)	64
Pixel size / μm	15

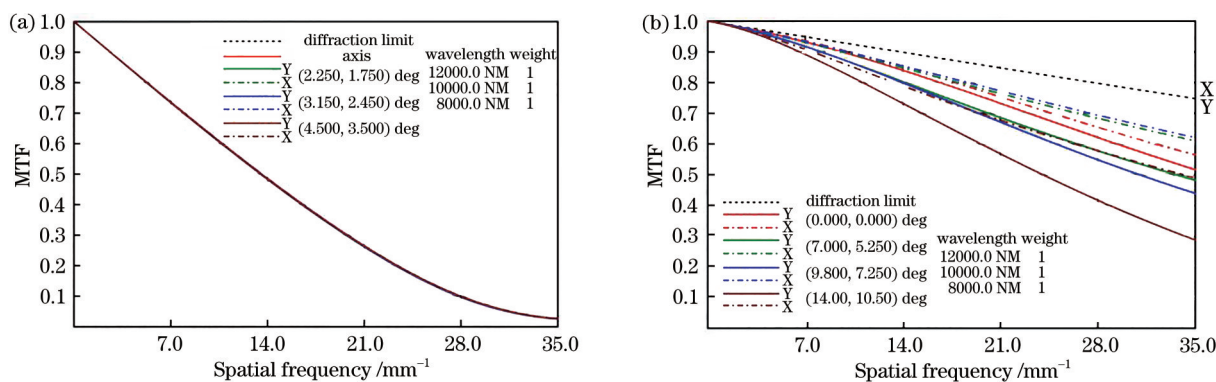


图3 MTF曲线。(a)中央系统MTF曲线;(b)边缘系统MTF曲线

Fig. 3 The MTF curves. (a) MTF curve of central system; (b) MTF curve of edge system

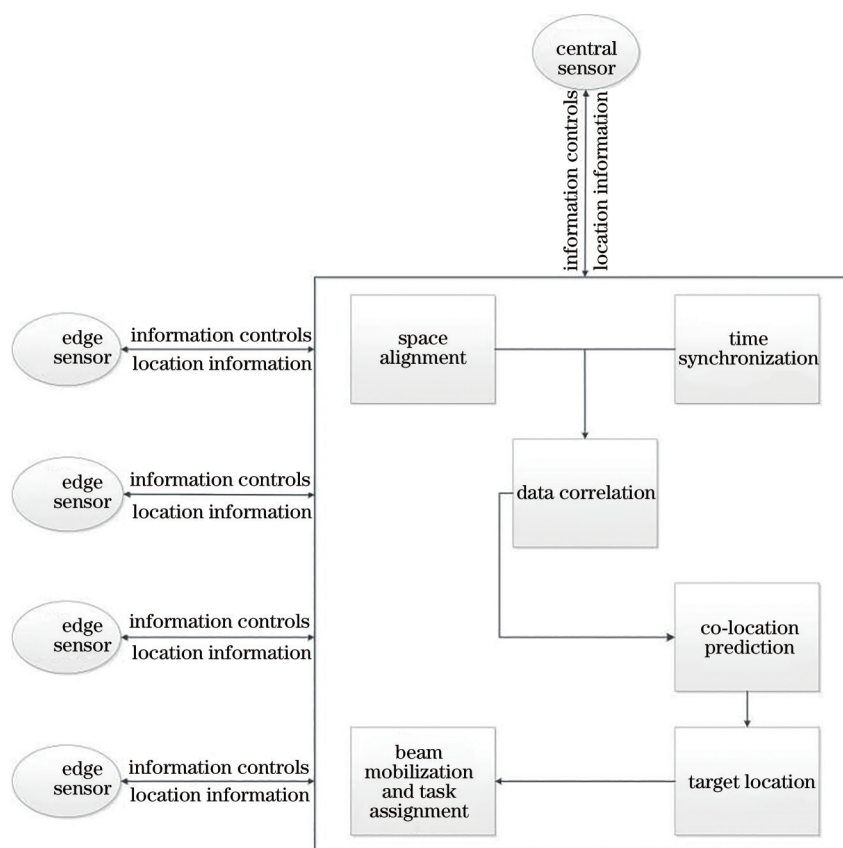


图4 多传感器网络

Fig. 4 Multi-sensor network

KQML设计了一套标准的Agent通信源语,定义了一种方便通信的模型,可以使Agent表达特定的动作,该语言既是一种消息格式,也是一种消息处理协议,以支持运行时代理之间的知识共享。本文利用KQML语言对多Agent协同工作进行编译,内容如图6所示。首先边缘Agent进行信息的传递,将含有目标位置信息的内容发送到中央Agent,经过任务规划对中央Agent发布命令,并根据动作-条件机制将中央传感器转向至目标所在区域,最终实现

Agent之间的协同工作,以实现多传感器网络的智能协同控制。

基于空对地仿真探测平台,结合Agent智能协同控制策略,仿真模拟了多孔径工作方式,如图7所示。图7中,红色区域为中央高分辨光学系统探测区域,其他4个区域分别对应边缘子孔径光学系统左上、右上、左下、右下的探测区域。当发现目标时,边缘Agent将目标所在区域信息通过通讯语言传递到中央Agent,使得中央高分辨光学系统转向

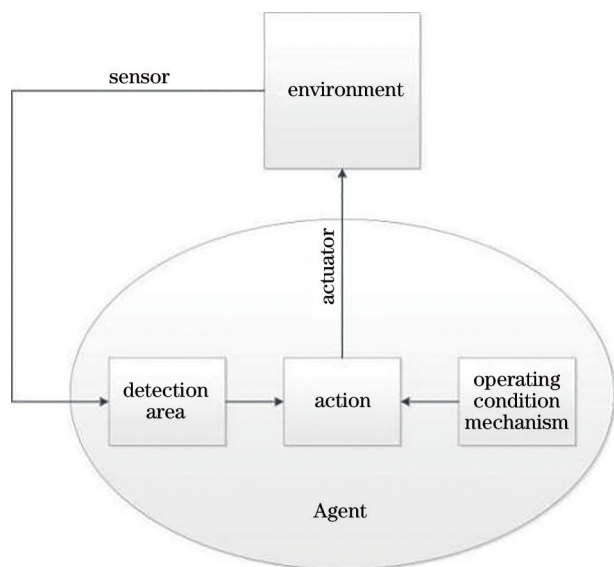


图 5 Agent 系统单元
Fig. 5 Agent system unit

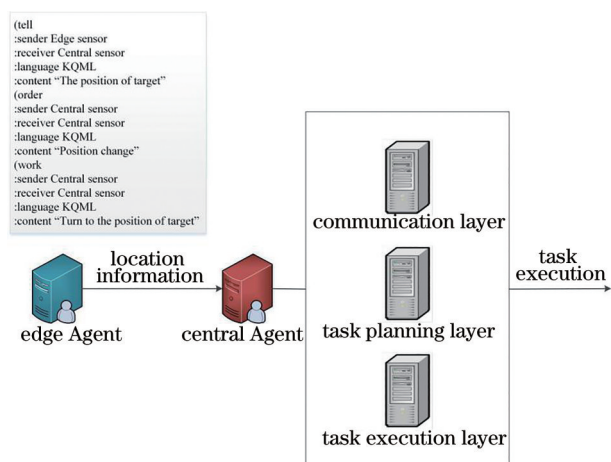


图 6 Agent 协同工作图
Fig. 6 Agent collaborative working diagram

至目标所在区域,继而实现目标区域的高分辨率成像。当边缘子孔径光学系统左上探测区域发现目标时,红色对应的中央高分辨光学系统探测区域将转向至目标所在的左上区域,如图 7(b)所示。

4 子图像拼接与变分辨率图像融合

4.1 大视场图像拼接

图像拼接是一种将同一场景的多个带有重叠区域的图像拼接成较大图像的方法^[17-20]。所设计光学系统进行具体拼接步骤的划分流程如图 8 所示。首先将待拼接子图像输入,然后对待拼接子图像进行特征点识取,接下来进行图像配准,再对图像进行变形和融合,得到一幅拼接图像。重复以上步骤,直至将所有子图像拼接完毕,最终输出拼接完

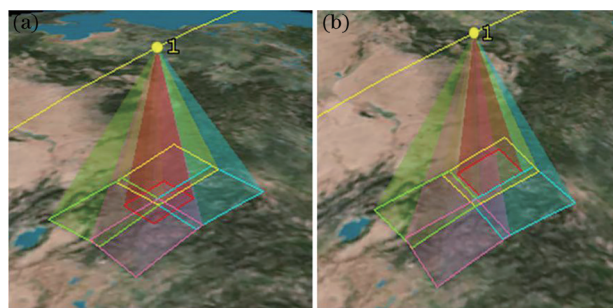


图 7 多传感器网络探测区域的仿真。(a)中央镜头位于中央时的探测图;(b)中央镜头位于左上时的探测图

Fig.7 Simulation of multi-sensor network detection area. (a) Detection image when the center lens is at the center; (b) detection image when the center lens is at the top left of the large field of view image.

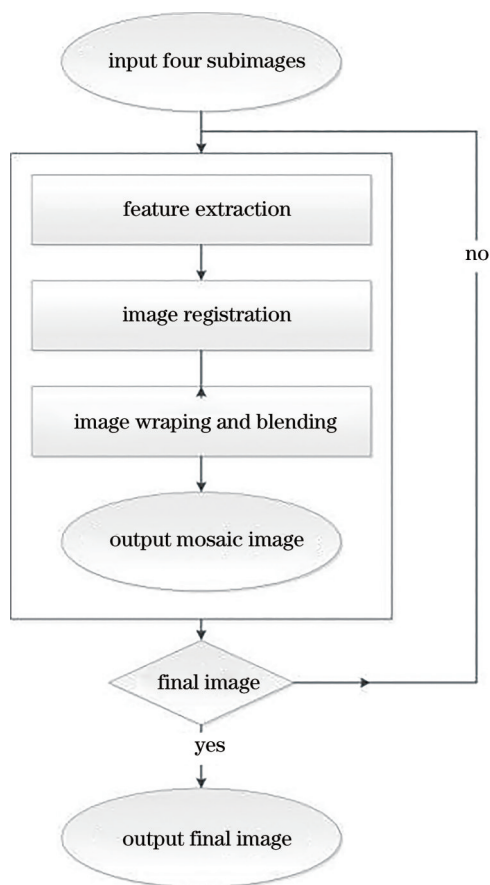


图 8 图像拼接流程图
Fig. 8 Flow chart of image mosaic

4.1.1 特征点提取

依次输入四幅边缘子孔径对应图像,得到待拼接图像,如图 9 所示。其中,图 9(a)、(b)、(c)、(d)分别代表左上、右上、左下、右下边缘子孔径探测区域的图像。每相邻两幅子图像有 16% 的视场重叠区域,实现了大视场图像的拼接。采用 SURF 算法进

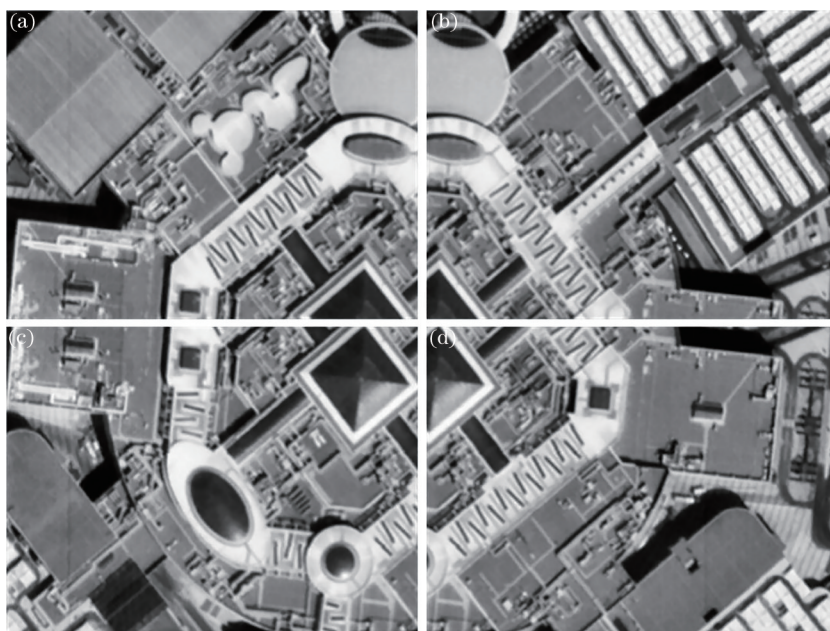


图 9 边缘探测区域中待拼接图像。(a) 左上探测区域;(b) 右上探测区域;(c) 左下探测区域;(d) 右下探测区域
Fig. 9 Images to be spliced in edge detection area. (a) Upper left detection area; (b) upper right detection area; (c) lower left detection area; (d) lower right detection area

行特征点识取, 构建的 Hessian 矩阵及其判别式^[21]

$$\mathbf{H}[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\det(\mathbf{H}) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2. \quad (5)$$

应用 Hessian 矩阵处理后, 采用三维线性插值法对所有输入图像中全部像素点中的最大值点进行处理, 得到亚像素级的特征点, 并去除其中小于阈值的点, 然后对输入图片中的最显著特征点进行标记, 如图 10 所示, 其中圆所框选的区域即为显著特征点区域。

4.1.2 特征点配准

使用 MSAC 算法进行特征点的匹配和误匹配点的消除^[22]。首先随机选取 n 个特征点用来拟合模型 \mathbf{M} , 模型 \mathbf{M} 表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对未选取的点计算变换误差, 其中小于阈值的点放入集合中。如果当前内点集和元素的个数大于最优内点集和个数, 则更新最优内点集和元素个数, 同时更新迭代次数 k 。如果计算的迭代次数大于 k 则退出; 否则迭代次数加 1, 并重复上述步骤。 k

表示为

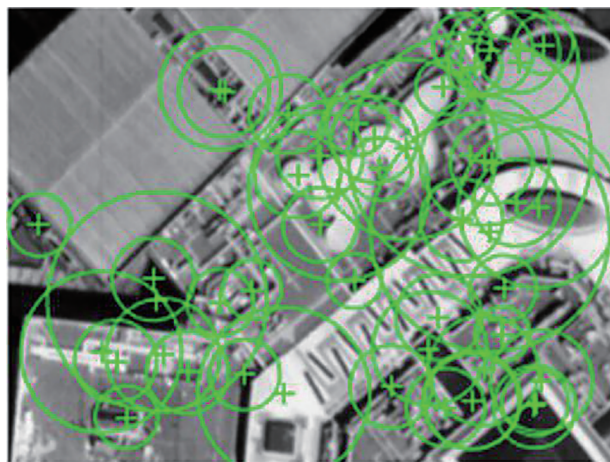


图 10 特征点识取
Fig. 10 Feature point recognition

表示为

$$k = \frac{\log(1-p)}{\log(1-\omega^n)}, \quad (7)$$

式中: ω 为 N 个特征点中的内点比率; p 为 k 次选择后 n 个点被选为内点的概率。MSAC 算法相比 RANSAC 算法优化了损失函数, 减小了阈值对模型的影响且提升了所选取点的可靠性。MSAC 算法的损失函数表示为

$$L(e) = \begin{cases} e, & e \leq T \\ T, & e > T \end{cases}, \quad (8)$$

式中： e 为误差； T 为误差阈值。

特征点匹配结果如图 11(a)所示,其中圆圈和加号分别代表两幅图像对应的特征点,直线为特征点之间的匹配连线。去误差点匹配结果如图 11(b)所示,通过 MSAC 算法仅对出现的一对误匹配点进行消除,得到正确线性匹配的图像,最后通过渐入融合方法实现子图像的拼接。由于需要对空间位置不同的四幅图像进行拼接,所以需要对 SURF 语法进行一定改进。为实现图像的平滑拼接且保持图片尺度的一致性,首先对左侧两幅子图像进行图像拼接,且将首次拼接过程中产生的图像掩模应用到右侧拼接过程中;随后对得到的两幅拼接图像进行 90° 旋转,以保持输出图像的比例与上文一致;最后对所获得的两幅拼接图像进行最后的大视场拼接。拼接完成后的大视场图像如图 12 所示。

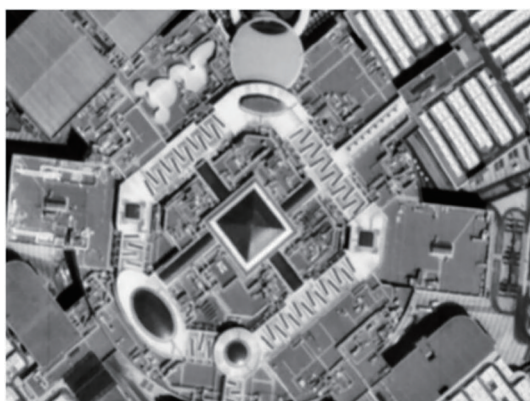


图 12 拼接完成图像

Fig. 12 Finished mosaic image

4.2 变分辨率图像融合

利用周向分布的四组子孔图像进行视场拼接构成大搜索视场,对拼接完成的低分辨率图像与中央光学系统的高分辨率图像进行变分辨率融合,从而实现该红外光学系统的大视场、高分辨探测。当获取目标所在位置信息后,将中央高分辨率光学系统对准目标所在区域,从而获得拼接完成后的大视场低

分辨率图像与目标所在区域的高分辨率图像。为实现具有大视场和目标所在区域高分辨的整体图像输出,首先对目标所在位置进行确定并进行区域划分,从而根据目标所在区域对大视场图像进行感兴趣区域的设置;继而对高分辨图像与大视场图像进行线性混合处理,通过加权线性融合,高分辨图像无缝融合到大视场图像的感兴趣区域,从而实现变分辨率图像融合。线性融合表达式为

$$\text{dst}(I) = \text{saturate}[\text{src1}(I) \times \alpha + \text{src2}(I) \times \beta + \gamma], \quad (9)$$

式中： $\text{src1}(\cdot)$ 和 $\text{src2}(\cdot)$ 分别对应大视场低分辨率图像与高分辨图像； α 和 β 为对应数组的权重， γ 为加到权重总和上的标量值； $\text{saturate}[\cdot]$ 为加权后的数组。由于 I 是数组元素的多维索引,且对于多通道阵列,每个通道都可独立进行处理,所以可将其用一个矩阵表达式进行替换,表达式描述为

$$\text{dst} = \text{src1} \times \alpha + \text{src2} \times \beta + \gamma. \quad (10)$$

最终获得一幅具有大视场和局部区域高分辨的整体图像,最终图像如图 13 所示。

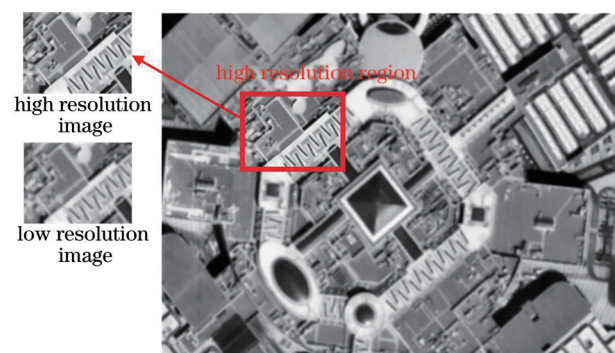


图 13 最终图像

Fig. 13 The final image

5 结 论

对仿鹰眼大视场高分辨智能成像系统进行了研究。针对弹载光电平台,基于鹰眼视觉原理,设计了五组长波红外光学子孔径系统,包含四路边缘

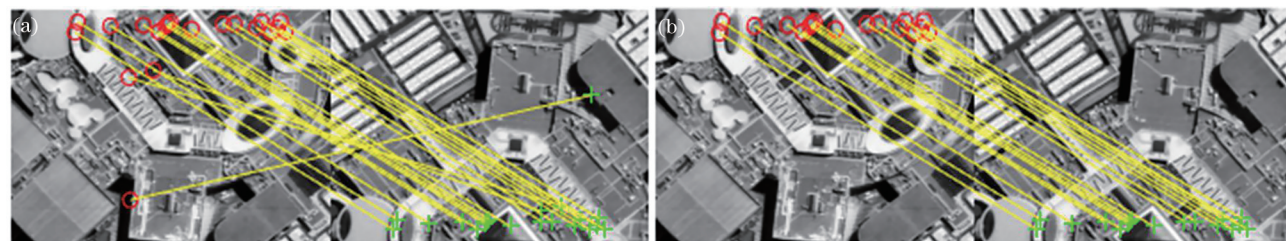


图 11 图像配准。(a)特征点匹配;(b)去除误差点匹配

Fig. 11 Image registration. (a) Feature point matching; (b) matching after removing error points

光学系统和一路中央可运动高分辨光学系统,实现大视场和高分辨探测的要求。为实现智能成像,引入了 Agent 理论,实现了多传感器间智能协同控制。采用 SURF 算法对子孔径图像进行拼接,有效扩大了系统的视场探测范围。对中央光学系统探测区域的高分辨图像与边缘四组子孔径光学系统探测区域的低分辨图像进行变分辨率融合,实现了大视场和高分辨率图像的融合和单幅图像的整体获取。研究成果可为解决大视场高分辨率探测提供技术储备和支持。

参 考 文 献

- [1] Zhao G Z, Duan H B. Progresses in biological eagle-eye vision technology[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2017, 47(5): 514-523.
赵国治, 段海滨. 仿鹰眼视觉技术研究进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47(5): 514-523.
- [2] Liu G Q. Research on guidance and control technology for cruise missile based on bionics vision theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
刘国琴. 基于仿生视觉原理的巡航导弹制导与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [3] Duan H B, Xin L, Chen S J. Robust cooperative target detection for a vision-based UAVs autonomous aerial refueling platform via the contrast sensitivity mechanism of eagle's eye[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(3): 18-30.
- [4] Li Y J, Zhang K. Vision bionics image guidance technique and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
李言俊, 张科. 视觉仿生成像制导技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] Kolba M P, Scott W R, Collins L M. A framework for information-based sensor management for the detection of static targets[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(1): 105-120.
- [6] Mei G, Zhai Y, Miao J Y, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222004.
梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222004.
- [7] 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.
- [8] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0922001.
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0922001.
- [9] Yang D K. Object search and area resolution improved in large visual field based on biological eagle vision[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
杨道锟. 仿鹰眼大视场目标搜索与目标区域空间分辨率提高技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [10] Zuo B J, Kuang Y W. Optical design of the IR/ladar dual-mode seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 495-499.
左保军, 况耀武. 红外/激光双模导引头的光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 495-499.
- [11] Golpayegani F. Multi-agent collaboration in distributed self-adaptive systems[C] // 2015 IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops, September 21-25, 2015, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 146-151.
- [12] Li W, Zhang F M. Research and design of sensor management system based on multi-agent[J]. *Microcomputer Information*, 2006, 22(19): 157-159.
李薇, 张凤鸣. 基于多 Agent 的传感器管理系统研究与设计[J]. *微计算机信息*, 2006, 22(19): 157-159.
- [13] Ni J. Research on multi-agent based multi-sensor resource management[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2015.
倪晋. 基于多 Agent 的多传感器资源管理方法研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2015.
- [14] Wan H. Research into multi-sensor cooperative location technology[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2014, 37(3): 30-32.
万华. 多传感器协同定位技术研究[J]. *舰船电子对抗*, 2014, 37(3): 30-32.
- [15] Fan Z Z. Research on application of collaborative monitoring on multi-sensor network[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015.
范真真. 多传感器网络化协同监控应用研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- [16] Gong J W, Wang X F, Yang R J. Cooperative

- tracking technology of single target multi-sensor based on cooperative index[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2020, 25(4): 1594-1603.
- [17] Li S C. Design of multiaperture variable resolution optical system and study of image reconstruction technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
李善闯. 多孔径变分辨率光学系统设计与图像重构技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [18] Wu X, Wang X R, Zhang J Q, et al. Analysis of the features and reconstruction of a high resolution infrared image based on a multi-aperture imaging system[J]. *Optik*, 2014, 125(19): 5888-5892.
- [19] Wu G. Research on feature point registration and multi-resolution fusion in image mosaic[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- 吴戈. 图像拼接中的特征点配准与多分辨率融合方法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
- [20] Wang W F, Zhang Y X, Chen Y, et al. Wide field-of-view image stitching algorithm based on depth sequence of light field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0915003.
王文锋, 张焱鑫, 陈瑜, 等. 基于光场深度序列的大视野图像拼接算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0915003.
- [21] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [22] Wu S L, Zeng W K, Chen H D. A sub-pixel image registration algorithm based on SURF and M-estimator sample consensus[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2020, 140: 261-266.