

热成像模式及其图像处理技术的研究与应用

金伟其*, 李力, 王霞

北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 热成像技术具有广泛的应用领域,随着红外焦平面探测器及数字图像处理技术的发展,新型热成像模式及其图像处理技术成为国内外发展的重要方向。介绍了近年来研究的几个典型进展,其中改进的基于场景特征的时域高通与空域低通滤波结合的非均匀性校正方法能够有效滤除制冷热成像系统观察低温天空场景时的水波纹固定图案噪声,并在 FPGA 硬件平台上实现了算法移植;研制出红外分焦平面偏振片阵列,实现了中波制冷和长波非制冷红外焦平面探测器的耦合成像,并通过考虑偏振片效应的偏振成像模型,滤除光路中偏振片的辐射影响;研制出基于常规制冷长波红外焦平面探测器的超频高动态热成像系统,在 FPGA 实现了多积分时间图像融合-细节增强级联的 HDR 图像融合方法,实现了对高动态场景的实时成像;研究了“田”字型四孔径和“十”字型四/五孔径等三类紧凑型视场部分重叠仿生复眼热成像模式,研制了 2 套实验系统来验证该方法的有效性;提出一种基于双生成对抗网络的非配对热红外-可见光图像转换算法 TIV-Net,该方法能够将热图像有效地转化为类彩色可见光图像,并在无人机等平台实现了不低于 20 Hz 的实时处理。以上具有创新性的技术突破或已获得应用或展现良好的应用前景,将是进一步研究完善的重要方向。

关键词 图像处理;热成像;高动态范围;偏振成像;仿生复眼;彩色化

中图分类号 O432; TN21

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230740

1 引言

红外热成像技术在军用和民用领域具有广泛的应用,实时数字图像处理作为红外成像系统的关键环节,成为国内外热成像技术研究的重要内容。随着当前红外焦平面阵列(IRFPA)探测器及智能图像处理技术的发展,新的热成像模式和相应的图像处理方法不断推陈出新,并取得了良好的效果。

非均匀性校正(NUC)技术是 IRFPA 必备的预处理环节^[1-2],通常包括基于辐射源的非均匀性校正(CBNUC)方法和基于场景的自适应非均匀性校正(SBNUC)方法^[3]。CBNUC 主要适用于实验室或在产品出厂前针对黑体源的校正,或 IRFPA 热像仪应用中的挡板校正,可有效减小和消除常见的条纹状、网格状固定图案噪声(FPN)以及“四角发亮/发暗”的锅盖状 FPN,但对工作过程中器件漂移所产生的动态 FPN 往往难以有效发挥作用。SBNUC 是近十多年来迅速发展的自适应非均匀性校正方法,目前发展了统计型^[4-5]、时域高通^[6-9]、配准型^[10-13]、神经网络^[14-17]、深度学习 SBNUC 方法^[18-19]及其他方法^[20-21],这些方法对多种 FPN 具有一定的校正效果,但在场景变化较小的情况下往往会出现误校正、产生鬼影等不利现象,且处理时

间各异,若要实现硬件实时处理则需要更深入的考虑^[16, 20]。

偏振热成像技术是当前国内外重点发展的新型红外成像模式,除获得目标场景的辐射强度信息外,还可获得目标场景的偏振信息,提高复杂背景下目标探测识别能力和透过烟雾观察能力,并进一步通过偏振解析获得更多的目标场景信息^[22-23]。目前偏振成像已发展出分时、分孔径、分振幅、分焦平面等模式^[24-25],对动态目标场景的成像需要采用同时偏振成像系统。基于分焦平面偏振片阵列的偏振热成像技术是当前国内外重点发展的方向^[26];2018年,刘海峥等^[27]研究了基于微偏振片阵列的制冷中波红外成像非均匀性产生机理及其校正方法;2019年, Li 等^[28]使用红外偏振成像的多功能等离子体超材料吸收体的逆向设计,通过微纳光栅刻蚀工艺制作分焦平面中波红外偏振探测器,所得到的亚波长金属光栅周期为 386.7 nm,光谱吸收率为 70%,消光比为 40.6%;2018年,北方广微科技有限公司联合西北工业大学赵永强教授研究团队推出非制冷红外分焦平面偏振相机,采用像素规模为 640 pixel×512 pixel,像素尺寸为 17 μm 的非制冷红外焦平面探测器刻蚀 0°、45°、90°、135° 这 4 个偏振方向的成像,但该非制冷红外分焦平面偏振相机的消光比较

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-04-09; 录用日期: 2023-05-09; 网络首发日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61871034)、装备预先研究领域基金(61404140513)

通信作者: *jinwq@bit.edu.cn

低^[29]。我们认为,在非制冷微桥上刻蚀偏振光栅的过程中,消光方向的辐射可能被光栅吸收,导致微桥温度变化,从而导致消光比降低。

战场环境存在太阳光、火焰和干扰弹等强辐射干扰,为了实现如此背景下常温目标的探测识别与跟踪,需要发展高动态范围(HDR)热成像技术。目前常规制冷热成像系统的动态范围大多在 60 dB~70 dB,适应约数百摄氏度的场景温度范围,难以观测更高温度的高动态场景目标,出现过低信号或饱和信号区域,影响关键目标的探测与跟踪。受红外探测器所限,目前关于 HDR 热成像方法和技术的报道较少,HDR 热成像技术大致有基于数字像元^[30]和基于超频的 HDR 热成像方法^[31-34]:前者的技术先进,性能更佳,但需要使用新的 IRFPA 工艺和信号处理技术;后者采用常规的 IRFPA,通过超频驱动的多积分时间采集重构 HDR 图像(例如,采用 200 Hz 的 IRFPA 驱动 4 个积分时间成像,融合构成常规 50 Hz 的 HDR 图像),即只需要进行信号和图像处理即可实现 HDR 热成像,具有较高的性价比和较好的市场应用前景。

仿生成像一直是人们研究探索的重要方向,近年来可见光仿生成像技术得到了迅速发展,除常规的分布式多相机仿生复眼外(扩大观察视场),一些新式紧凑型仿生复眼成像模式成为人们的研究重点^[35-39]。同时,仿生复眼热成像技术也取得了一些研究进展^[40-41],特别是利用仿生复眼的重叠视场区域实现变空间分辨率热成像、偏振热成像以及双色热成像等性能,展现出良好的发展和应用前景。

热成像技术受昼夜和雾霾等天候的影响小,成为当今军用和民用领域重要的图像信息获取手段。但是热图像通常为灰度图像,且辐射场分布与可见光反射图像的差异较大,不适宜人眼长时间观察。近十多年来,微光夜视与红外热成像的自然感彩色融合技术^[42-44]使人们能够获得自然感彩色的夜间场景图像,提高了对夜间人眼态势感知的能力。随着近年来人工智能技术的发展,直接将热成像图像实时转化为自然

感彩色可见光图像的方法成为新的研究热点^[45-49],不仅使得热成像更适合人眼观察习惯,在车辆/无人机驾驶等需要人眼观察的应用中显露头角,而且类可见光彩色热图像可借助日趋成熟的可见光图像目标识别与跟踪的技术。

北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室(以下简称“本实验室”)长期从事夜视与红外技术的研究,近年来在热成像模式及其处理方法等方面开展了较为深入的研究。针对以上几个热成像处理技术方面的需求,本文主要介绍本实验室近年来的研究进展,期望能够对相关技术研究和应用起到积极的促进作用。

2 典型热成像模式及其图像处理技术的研究与应用

2.1 基于场景的自适应非均匀性校正技术及其应用

SBNUC 和数字细节增强(DDE)是热成像图像预处理的核心环节,本实验室致力于抑制 SBNUC 中易出现的“退化”和“鬼影”现象,相关的算法在一些系统或产品中得到应用。

制冷 IRFPA 热像仪在观察低温天空场景时,往往会出现类似水波纹的 FPN(图 1),严重干扰对天空弱小目标的探测、识别和跟踪。此类非均匀性噪声不仅难以采用 CBNUC,许多 SBNUC 方法也难以奏效。本实验室提出一种基于灰度映射的时域高通非均匀性校正算法(THP&GM)^[50],对“水纹状”FPN 具有快速滤除效果,并在进一步优化后提出一种改进的基于场景特征的时域高通与空域低通滤波(ITHP&GM)结合的 NUC 方法^[8]。基于 ITHP&GM 的 NUC 方法不仅可以通过加入场景模糊分类模块,建立天空接近度函数,还能够根据场景自适应调整对天空场景阈值进行校正,避免了对复杂地物场景校正时的图像“退化”和“鬼影”,提高了水纹状 FPN 校正算法应用的有效性和稳定性,并在 FPGA 硬件平台上实现了算法移植。

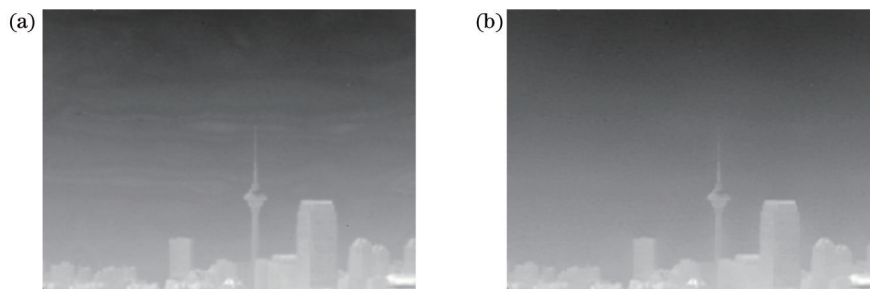


图 1 近地天空带有水纹状 FPN 的热图像。(a)原始图像;(b)校正图像

Fig. 1 Thermal images with water ripple FPN in the near-earth sky. (a) Original image; (b) correction image

在 IRFPA 的 NUC 中,通常用一个线性模型来描述像元的读出信号 $y_{i,j}$,即

$$y_{i,j}(n) = G_{i,j}(n)x_{i,j}(n) + O_{i,j}(n), \quad (1)$$

式中: $x_{i,j}$ 表示 (i,j) 像元入射辐射值; $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 分别为

(i, j) 处的增益和偏置系数; n 为图像序列帧号。

用一点校正模型在一定辐射范围内对偏置系数进行动态校正, 即

$$\hat{y}_{i,j}(n) = Y_{i,j}(n) + \hat{O}_{i,j}(n), \quad (2)$$

式中: $\hat{O}_{i,j}(n)$ 为像元 (i, j) 的偏置校正系数; $Y_{i,j}$ 为校正后的信号; $\hat{y}_{i,j}$ 为像元 (i, j) 一点校正后输出的灰度值。

时域高通算法模仿人眼光感受器、水平细胞和双极细胞之间的信号处理关系, 将原始信号与对应的时域低通滤波器作差, 构造出时域高通滤波器对图像进行 NUC 处理(图 2)。由于时域高通滤波没有考虑图像的空间灰度信息, 在图像静止或者图像中有静态景物时, 容易出现“退化”; 时域上的短时高频分量体现为相邻帧同一像素点的灰度差异较大, 易产生“鬼影”现象。

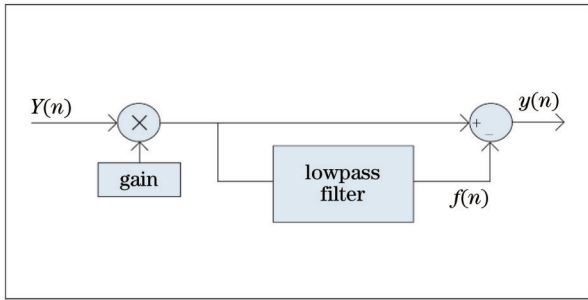


图 2 时域高通滤波 NUC 算法框图

Fig. 2 Block diagram of temporal high-pass filtering NUC algorithm

首先, 以时域高频分量为目标进行弱校正, 并以时域低频分量为非均匀性噪声, 对其进行迭代校正。迭代校正模型^[8]为

$$\hat{O}_{i,j}(n) = f_{i,j}(n) - Y_{i,j}(n), \quad (3)$$

$$\hat{O}_{i,j}(n+1) = \begin{cases} 0, & |Y_{i,j}(n+1) - Y_{i,j}(n)| \geq T_{te} \\ \hat{O}_{i,j}(n), & |Y_{i,j}(n+1) - Y_{i,j}(n)| < T_{te} \end{cases}, \quad (4)$$

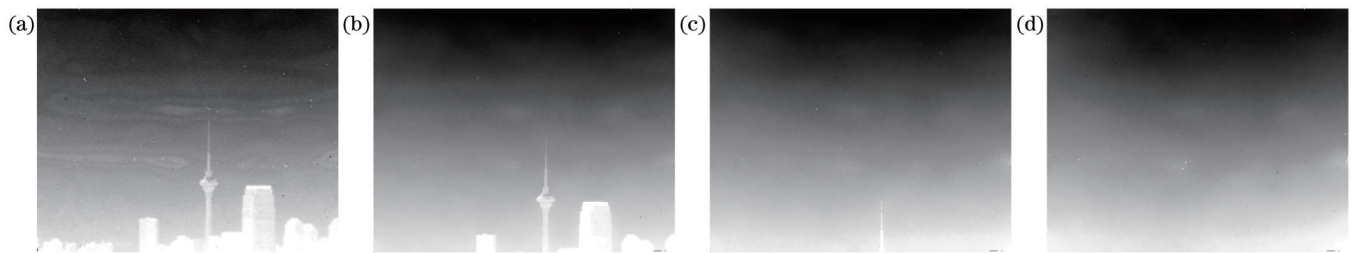


图 3 ITHP&GM 在 FPGA 平台的实时处理效果。(a) 第 1 帧; (b) 第 13 帧; (c) 第 55 帧; (d) 第 99 帧

Fig. 3 Real-time processing effect of ITHP&GM on FPGA platform. (a) Frame 1; (b) frame 13; (c) frame 55; (d) frame 99

本实验室研究的 SBNUC 算法与 DDE 算法已在多个领域获得应用, 例如通过拓展非制冷 IRFPA 的光谱响应到 $3 \sim 14 \mu\text{m}$, 研制了工业气体泄漏气云红外成像检测仪^[51]及其性能测评方法^[52], 实现了产品转化。

式中: $f(n)$ 为空域低通滤波的结果; T_{te} 为时域阈值。 T_{te} 越大, 校正参数越不容易被调整为 0, 逐帧迭代校正的像素数量就越多; 反之, 逐帧迭代校正的像素数量越少。

采用带有门限的低通滤波器来保护边缘, 将滤波窗口内与中心像素灰度差异大的像元剔除, 这类类似于双边滤波的思想, 但更为简化, 即

$$f_{i,j}(n) = \frac{\sum_{w=-v}^v \sum_{h=-v}^v \delta_{i+w,j+h}(n) \cdot \hat{y}_{i+w,j+h}(n)}{\sum_{w=-v}^v \sum_{h=-v}^v \delta_{i+w,j+h}(n)}, \quad (5)$$

$$\delta_{i+w,j+h} = \begin{cases} 1, & |\hat{y}_{i+w,j+h} - \hat{y}_{i,j}| < T_{sp} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: v 为滤波窗口半径; δ 为选择系数; T_{sp} 为空域阈值。使用的阈值 T_{sp} 越大, 滤波窗口就越大, 滤波后的图像更加模糊; 相反, 滤波器细节保留能力更强。

通过逐帧迭代模糊时域静止的非边缘像素, 使得图像中 FPN 很快被去除。然而, 算法性能取决于固定的空域阈值 T_{sp} 与时域阈值, 当图像中噪声严重时, 尤其对于只在观察天空场景时出现的空间连续的水纹状噪声, 阈值的选取较为艰难。

针对制冷 IRFPA 的水纹状 FPN 主要出现在天空的特点, 在 ITHP&GM 中加入场景模糊分类算法, 利用天空场景的特殊性判断天空与地面场景: 当视场充满天空时, 使用大空域阈值滤除强水纹状 FPN; 当视场内存在部分天空时, 使用中空域阈值滤除弱水纹状 FPN; 当视场内全部是地物场景时, 使用很小的空域阈值保护图像细节。

采用 $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的制冷中波热像仪以及 FPGA 硬件平台^[8](以 Xilinx 公司 FPGA 为核心处理器件, $2 \times 9 \text{ Mb}$ SRAM) 观察天地相接场景的红外图像, 证明 ITHP&GM 算法可有效滤除水纹状非均匀性噪声(图 3)。这是目前少数能够实时滤除水纹状 FPN 的 SBNUC 算法报道。

图 4 给出用于化工园区、油气田的工业气体泄漏气云红外成像检测仪及其应用情况。

2.2 偏振热成像技术

本实验室多年来持续研究红外偏振成像理论与方



图 4 用于化工园区、油气田的工业气体泄漏气云红外成像检测仪及其应用场景

Fig. 4 Infrared imaging detectors for industrial gas leakage gas cloud, which are used in chemical industry parks and oil and gas fields, and their application scenarios

法,建立了分时 MW-偏振热成像系统和同时多孔径 LW-偏振热成像系统(图 5),并取得了一系列成果。

本实验室研究了红外分焦平面偏振片阵列的设计理论和制作工艺,研制了 4 偏振和 3 偏振+1 强度的红外偏振片阵列(图 6),并分别实现与制冷型 MW-

IRFPA 机芯(320×256, 25 μm)和非制冷 LW-IRFPA 机芯(640×512, 17 μm)的耦合与成像。图 7 所示为非制冷 LW-IRFPA 偏振成像实验系统及其成像效果,所获得的偏振度图像有别于强度图像,客车周边的反射图像更为清晰。

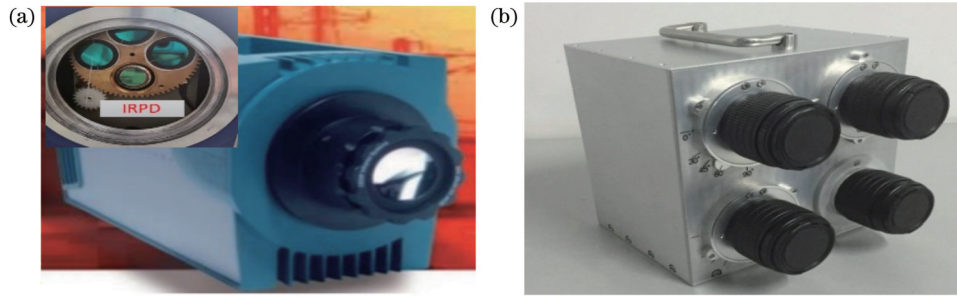


图 5 红外偏振热成像系统。(a)分时、中波红外;(b)多孔径、长波红外

Fig. 5 Infrared polarization thermal imaging system. (a) Time-sharing MW-IR; (b) multi-aperture LW-IR

由于偏振片处于 IRFPA 前端,不论是在物镜前/后,或是在非制冷 IRFPA 的焦面上,偏振片自发辐射和反射辐射都会对偏振热成像特别是后续基于检偏图像的偏振信息(偏振度、偏转角及其他运算)解析产生明显的影响。图 8 所示为一种前置偏振片偏振热成像系统修正模型^[53],其中 S_m 为来自场景的入射斯托克斯

矢量, R 为系统自身辐射经偏振片反射和光学系统作用后在像面处产生的附加光强(实心燕尾箭头和三角箭头分别表示引起该项的系统辐射的入射和反射路径), T_1 、 T_2 分别表示偏振片主方向及其正交方向的能量透过率, ρ 表示光学系统的透过率。

考虑偏振片能量透过率之后的系数矩阵 M_c 变为

$$M_c = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_1 + T_2 & (T_1 - T_2) \cos(2\theta_0) & (T_1 - T_2) \sin(2\theta_0) \\ T_1 + T_2 & (T_1 - T_2) \cos(2\theta_1) & (T_1 - T_2) \sin(2\theta_1) \\ T_1 + T_2 & (T_1 - T_2) \cos(2\theta_2) & (T_1 - T_2) \sin(2\theta_2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则像元接收的辐射强度可重新表示为

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [I_i \cdot (T_1 + T_2) + Q_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \cos(2\theta) + U_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \sin(2\theta)] + r, \quad (8)$$

式中: r 表示由偏振片自发辐射和反射辐射导致的附加光强。移除偏振片后像元直接接收的辐射强度为

$$I_{NP} = \rho \cdot I_i. \quad (9)$$

此时, I_α 和 $I_{\alpha+\pi/2}$ 变为

$$\begin{cases} I_\alpha = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [I_i \cdot (T_1 + T_2) + Q_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \cos(2\alpha) + U_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \sin(2\alpha)] + r \\ I_{\alpha+\pi/2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [I_i \cdot (T_1 + T_2) - Q_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \cos(2\alpha) - U_i \cdot (T_1 - T_2) \cdot \sin(2\alpha)] + r \end{cases}, \quad (10)$$

$$I_\alpha + I_{\alpha+\pi/2} = I_{NP} \cdot (T_1 + T_2) + 2r. \quad (11)$$

由 3 个检偏方向($\theta_0, \theta_1, \theta_2$)的检偏图像可得到

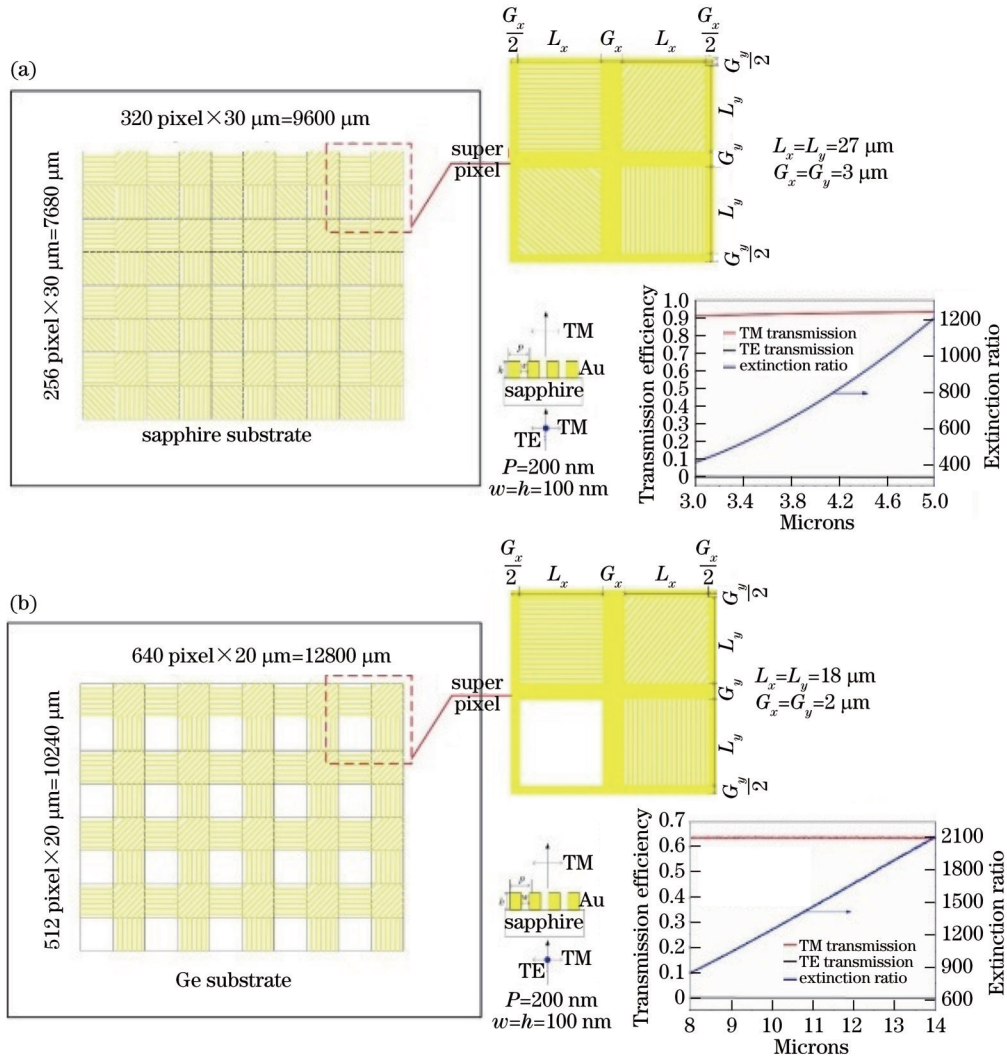


图 6 分焦平面偏振片阵列的设计与制作。(a) 4 偏振；(b) 3 偏振+1 强度

Fig. 6 Design and fabrication of focus plane polarizer array. (a) 4 polarization; (b) 3 polarization+1 intensity



图 7 非制冷偏振热成像实验系统及其偏振度图像

Fig. 7 Uncooled polarization thermal imaging experimental system and its polarization degree image

$$I = T_s \cdot M_c \cdot S_m + R, \quad (12)$$

式中： $I = [I_0 \ I_1 \ I_2]^T$ 为三次检偏测量的光强列向量； $T_s = \rho E_{3 \times 3}$ 为光学系统透过率矩阵； E 为单位矩

阵； $R = [r \ r \ r]^T$ 为偏振片自发辐射和系统辐射经偏振片反射后导致的附加光强，这里假定 r 与偏振片主方向无关。最后得到修正后的校正模型：

$$\begin{bmatrix} S_m \\ r \end{bmatrix} = M_1^{-1} \begin{bmatrix} I \\ I_{NP} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \rho(T_1 + T_2) & \rho(T_1 - T_2) \cos(2\theta_0) & \rho(T_1 - T_2) \sin(2\theta_0) & 2 \\ \rho(T_1 + T_2) & \rho(T_1 - T_2) \cos(2\theta_1) & \rho(T_1 - T_2) \sin(2\theta_1) & 2 \\ \rho(T_1 + T_2) & \rho(T_1 - T_2) \cos(2\theta_2) & \rho(T_1 - T_2) \sin(2\theta_2) & 2 \\ 2\rho & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ I_{NP} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

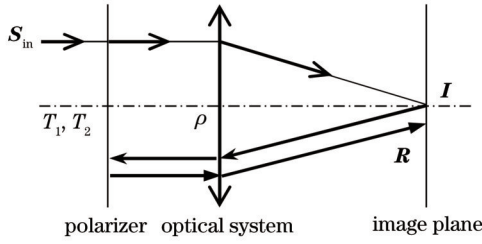


图 8 前置偏振片偏振热像仪修正原理图

Fig. 8 Schematic of pre-polarizer thermal imager correction

图 9 所示为偏振图像校正前后的对比,可以看出,偏振片的辐射主要对强度图像产生影响,经过校正的强度图像与非偏振成像结果一致,即可消除偏振片带来的辐射干扰。实验结果还表明,若不进行偏振片的

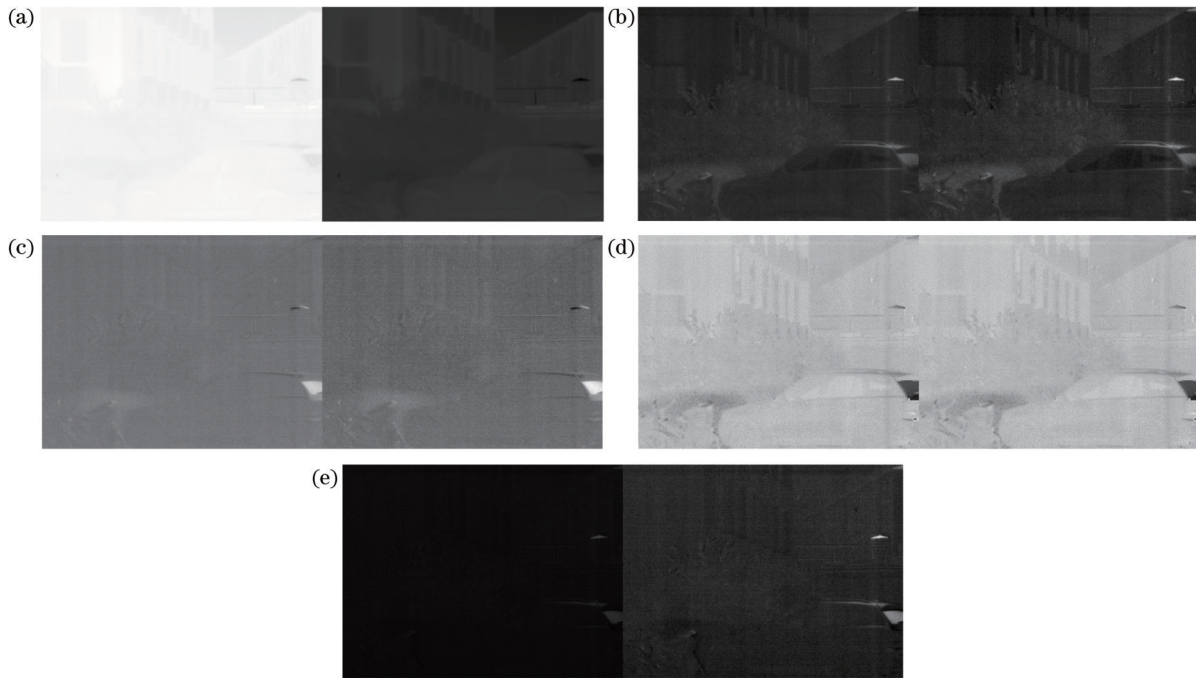


图 9 偏振图像校正前后对比。(a) I 分量; (b) Q 分量; (c) U 分量; (d) 偏振角 α ; (e) 偏振度 p

Fig. 9 Comparison of polarization images before and after correction. (a) I ; (b) Q ; (c) U ; (d) α ; (e) p

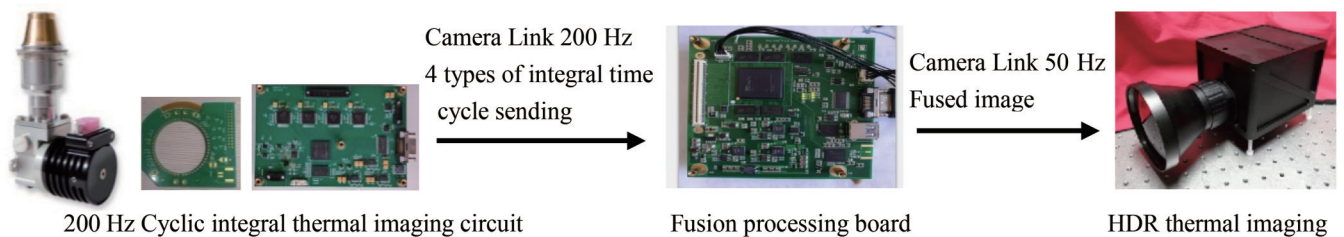


图 10 基于长波 IRFPA 的超频 HDR 热成像实验系统

Fig. 10 Super-frame HDR thermal imaging system based on long-wave IRFPA

由于常规 LW-IRFPA 的 4 帧变积分时间尚难以满足 100 dB 的 HDR 场景成像,考虑到太阳光、尾焰等典型高温目标与地物场景的差异,本实验室提出了多积分时间图像融合-细节增强级联的 HDR 图像非线性融合方

辐射校正,所得强度图像将明显偏离真实偏振图像,特别是基于非制冷 IRFPA 的偏振热成像系统,这一影响更为明显。

2.3 超频 HDR 热成像技术

本实验室研究了变积分时间条件下制冷 IRFPA 非均匀性校正系数的变化规律^[54]以及积分时间自动选择方法^[55]等,为变积分时间超频热成像奠定了理论基础;研制了基于 256×256 长波 IRFPA 的超频 HDR 热成像实验系统(图 10),采用 200 Hz 的频率实现成像,由 4 帧周期性变积分时间的低动态范围热图像融合为 50 Hz 帧频的数字视频图像输出,实现了包含高温目标的 HDR 热成像(图 11)。由于这是一种基于常规 IRFPA,只需驱动电路和处理算法变动即可实现的方法,因此它具有较高的性价比和较大的推广应用价值。

法^[56](图 12),并实现了 FPGA 处理平台的 HDR 热成像,实现了太阳光、火焰下常温目标场景的观察(图 13)。

为了实现对 HDR 热成像系统性能的评价,提出一种温差大于 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的动态场景 HDR 红外辐射源及其

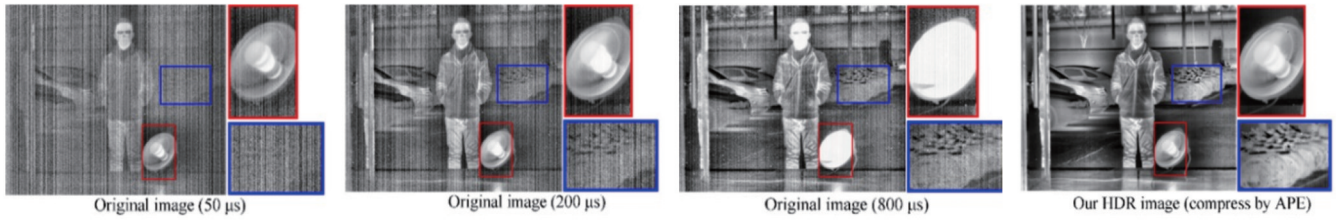


图 11 由 3 帧不同积分时间重构的 HDR 热成像

Fig. 11 HDR thermal imaging reconstructed from 3 frames at different integration times

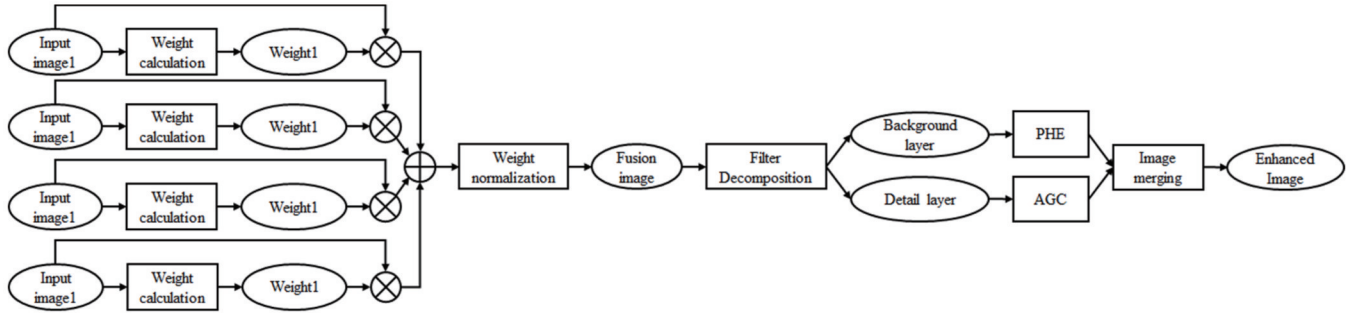


图 12 多积分时间图像融合-细节增强级联的 HDR 图像融合流程图

Fig. 12 Flow chart of multi-integral time image fusion-detail enhancement cascade HDR image fusion

评价方法^[57](图 14),通过低温和高温稳态辐射源测定 HDR 热成像系统的动态范围,系统跟踪中温动态辐射

源的响应变化,并从其与辐射源驱动信号的一致性判断是否满足动态性能要求。



图 13 典型高动态场景的成像效果^[56]

Fig. 13 Imaging effect of typical HDR scene^[56]

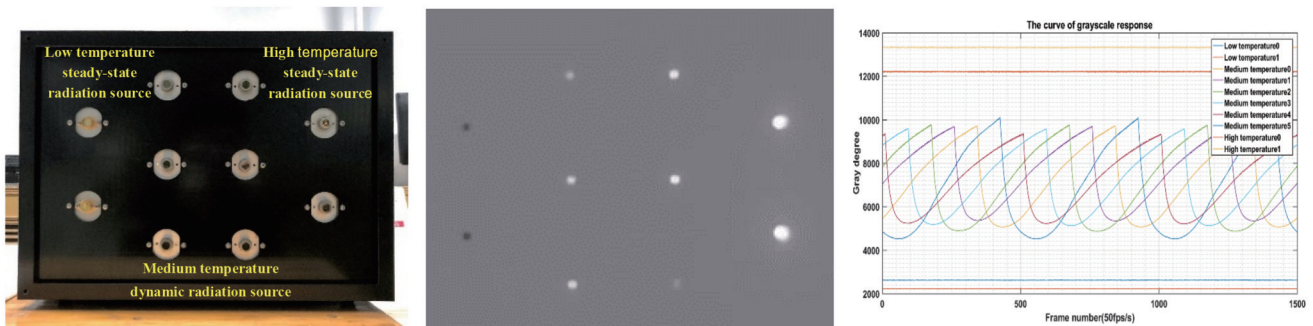


图 14 HDR 红外辐射源及其动态场景图像、中温动态辐射源部分的信号变化^[57]

Fig. 14 HDR IR radiation source and its dynamic scene image and signal changes of mid-temperature dynamic radiation source^[57]

2.4 仿生复眼热成像技术

本实验室研究了仿生复眼热成像模式及技术,提出了“田”字型四孔径和“十”字型四/五孔径等三类紧凑型视场部分重叠的仿生复眼热成像模式^[41, 46]

(图 15),可形成图 16 所示的多种视场重叠,不仅可实现拼接搜索大视场+中心视场超分辨的变空间分辨率成像模式,对快速运动目标进行定位识别,还可以通过在子眼上加装检偏片,在中心视场实现全偏振热成像。

此外,加装不同波段的探测器可形成双色或多色的热成像系统,等等。

本实验室还研究了基于子眼图像的大视场拼接以

及中心视场的高分辨成像、空间运动目标快速探测与定位跟踪、仿生复眼偏振热成像处理等算法,图 17 所示为大视场拼接图像示例。

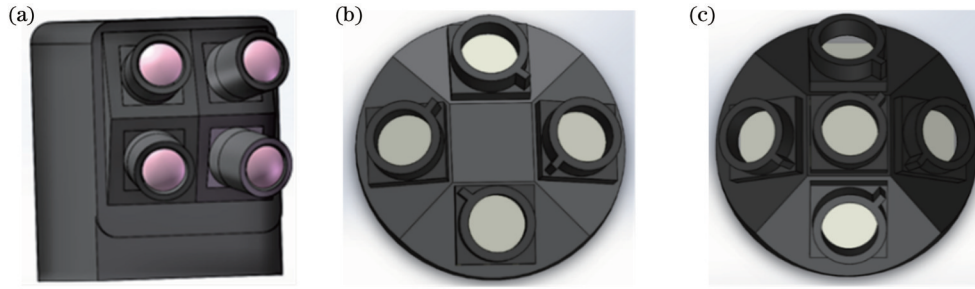


图 15 紧凑型仿生复眼热成像布局^[41, 46]。(a)“田”字型四孔径;(b)“十”字型四孔径;(c)“十”字型五孔径

Fig. 15 Compact bionic compound eye thermal imaging^[41, 46]. (a) "田" type, 4 aperture; (b) "十" type, 4 aperture; (c) "十" type, 5 aperture

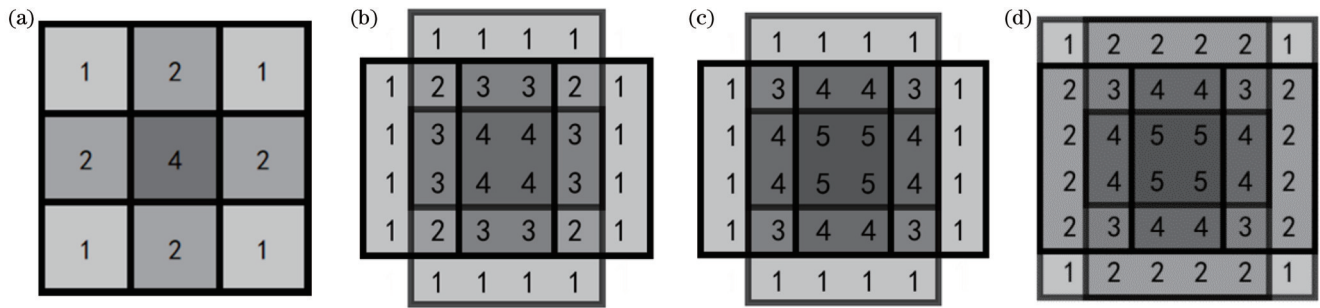


图 16 视场重叠示意图^[41, 46]。(a)“田”字型四孔径;(b)“十”字型四孔径;(c)(d)“十”字型五孔径(两种重叠规律)

Fig. 16 Schematic of field overlap^[41, 46]. (a) "田" type, 4 aperture; (b) "十" type, 4 aperture; (c)(d) "十" type, 5 aperture

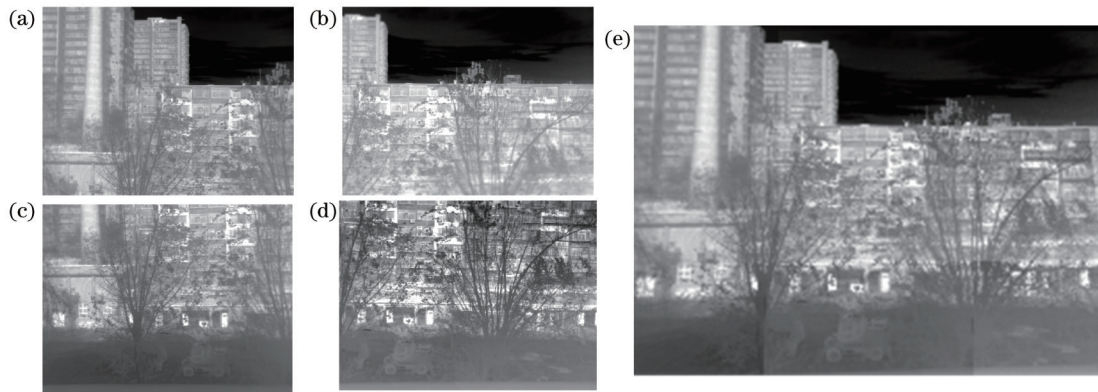


图 17 分布式仿生复眼热成像的图像。(a)子孔径1;(b)子孔径2;(c)子孔径3;(d)子孔径4;(e)大视场拼接

Fig. 17 Distributed bionic compound eye thermal imaging. (a) Sub-aperture 1; (b) sub-aperture 2; (c) sub-aperture 3; (d) sub-aperture 4; (e) stitched image with large FOV

采用 640×480 以及 80×80 非制冷 IRFPA 分别搭建了两套紧凑型“田”字型四孔径仿生复眼热成像实验系统,初步验证了项目的设想,特别是采用 80×80 或 128×128 的非制冷 IRFPA 可制成小型化仿生复眼热成像系统,类似昆虫红外复眼,可望在未来精确子弹、红外成像近程引信、无人机编队/导航等领域拓展新的应用场景。

2.5 热成像图像实时彩色可见光图像转化技术

在车辆/飞机驾驶、观察瞄准等领域,红外成像虽然可以昼夜工作,且受气象条件的影响较小,但灰度分布的红外图像仍不适合人眼长期观察,且不利于周边态势感知、场景的理解以及目标的搜索判别,因此,使热图像具有类似彩色可见光的场景再现将是一种非常引人关注的技术。近年来,人工智能技术的发展使得这一技术成为可能。

本实验室于 2019 年提出一种基于双生成对抗网络的非配对热红外-可见光图像转换(TGC-Net)算法^[45],基于 FLIR 车辆自动驾驶图像库的训练学习,初步获得了热图像-彩色可见光图像的转换;近期,致力于方法适应性和稳定性的研究,提出一种热红外到可见光彩色图像的转换(TIV-Net)算法,由于包含高质量热红外-可见光图片对的数据集很少,且大多无法满足精确配准的条件,同时受到噪声的影响,夜间低照度条件下可见光图像基本无法用于模型训练,因此将其

视为无监督图像翻译问题,使用基于对偶学习方法的 CycleGAN 作为基础框架,同时训练热红外转彩色可见光网络,两个转换网络的生成器和判别器分别使用相同的架构。如图 18 所示,算法框架同时训练热红外转彩色可见光网络(T2V-Net,实线框部分)和彩色可见光转热红外网络(V2T-Net,虚线框部分),并通过 cycle consistency loss 将二者联系在一起,从而实现无监督训练。

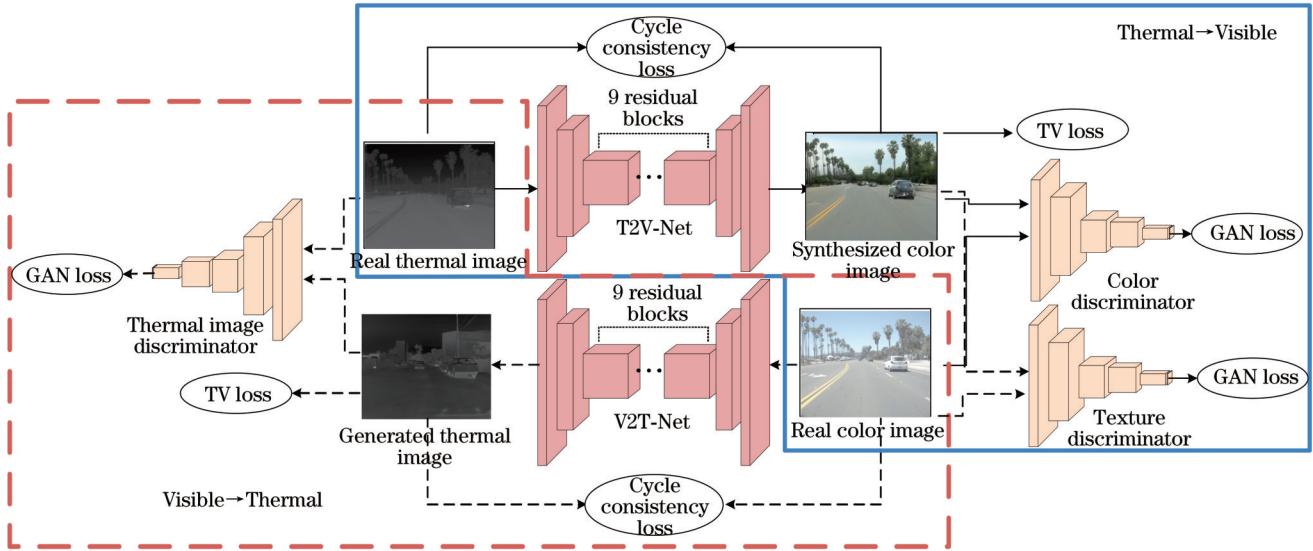


图 18 TIV-Net 训练框架

Fig. 18 TIV-Net training framework

目前,该网络算法已在图 19 所示的双通道红外与彩色可见光成像的地面平台[采用烟台艾睿非制冷组件 LA6110 (640 pixel×480 pixel, 17 μm, 帧频为 50 Hz)+红外物镜(焦距为 19 mm, F=1), SHL-1600 彩色可见光相机(像素规模为 1920 pixel×1080 pixel, 像素尺寸为 1.335 μm, 帧率为 60 Hz)+台式服务器]、双通道红外与彩色可见光成像的无人机平台(大疆御 MAVIC 2 行业版双光版无人机,起飞质量为 899 g,长

波非制冷 IRFPA 的像素规模为 160 pixel×120 pixel, 12 μm; 彩色相机 1/2.3 英寸 CMOS 像素规模为 4000 pixel×3000 pixel)+GPU 笔记本电脑服务器(i7-7820HK, 内存为 16 GB, GPU 显卡为 NVIDIA GeForce GTX1070 8 GB)上实现频率不低于 40 Hz 的实时处理,基于两个双波段图像采集平台针对车辆驾驶、直升机驾驶和地面侦察应用完成了包含 75000 对典型红外/可见光图像的图像库搭建。

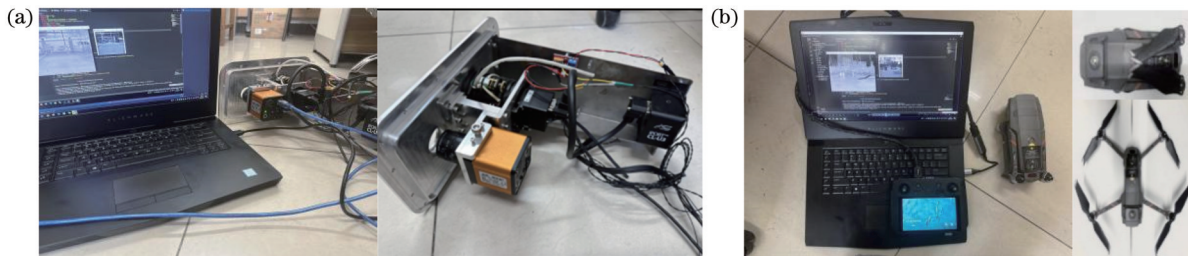


图 19 双通道红外与彩色可见光成像采集与处理。(a)地面平台;(b)无人机平台

Fig. 19 Dual-channel infrared and color visible imaging acquisition and processing. (a) Ground platform; (b) UAV platform

利用 FLIR 自动驾驶图像库以及自行采集的红外图像测试集进行测试对比,图 20 和图 21 分别为对 FLIR 数据集/自采数据集训练模型转换得到的图像效果,其中第 1 列和第 7 列分别为实际现场采集的灰度热图像和可见光图像,第 2~5 列对比算法分别是由 Zhu

等^[48]提出的 CycleGAN(2017 年)、由 Li 等^[47]提出的 I2VGAN(2021 年)、由 Kuang 等^[46, 49]提出的 TICCGAN(2020 年)、由刘明聪^[45]提出的 TGC-Net(2019 年),第 6 列为 TIV-Net 算法。仿真和实际外场热成像实验结果均表明,白天和夜晚的热图像都可通

过转化模型得到较自然的彩色图像,证明了 TIV-Net 算法的有效性。



图 20 FLIR 数据集在自行采集的红外图像测试集上训练的模型转换结果

Fig. 20 Model conversion results of FLIR data set training on our infrared image test set

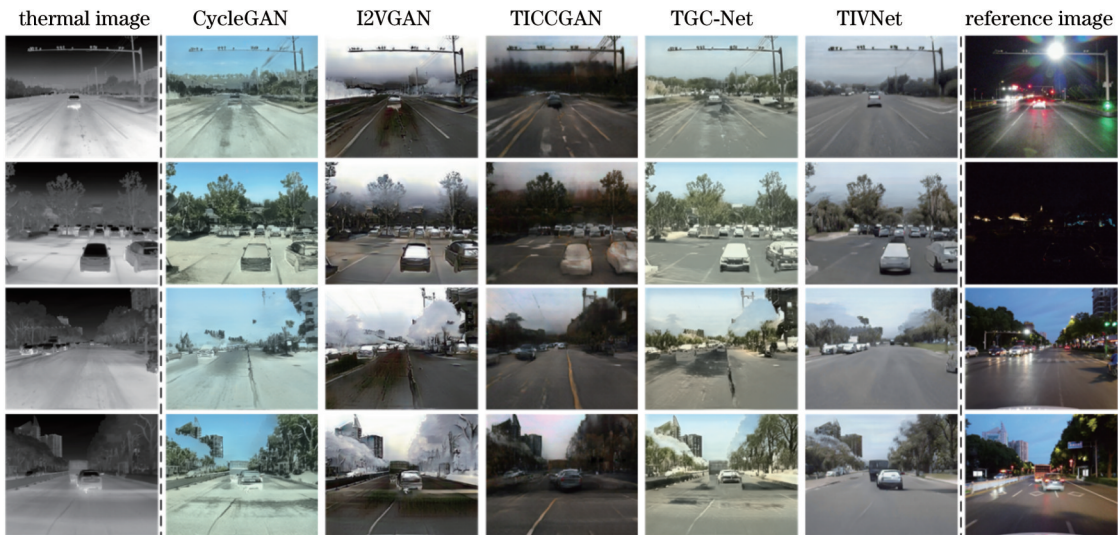


图 21 自建数据集在自行采集的红外图像测试集上训练的模型转换结果

Fig. 21 Model conversion results of our own data set training on our infrared image test set

3 结束语

本文总结了本实验室在新型热成像模式及其图像处理技术方面的研究及应用进展,相关的研究成果如下:

1) 提出一种改进的基于场景特征的时域高通与空域低通滤波相结合的 NUC 方法——ITHP&GM,该方法能够根据场景自适应调整对天空场景阈值的校正,避免了对复杂地物场景校正时的图像“退化”和“鬼影”,提高了水纹状 NUC 算法的有效性和稳定性,在 FPGA 硬件平台上实现了算法移植,并实现某中波红外制冷热像仪中应用;

2) 研究了分焦平面红外偏振片阵列的设计理论和制作工艺,完成了 4 偏振和 3 偏振+1 强度的分焦平面红外偏振片阵列制作,实现了与制冷 MW-IRFP 机

芯 (320 pixel \times 256 pixel, 25 μ m) 和非制冷 LW-IRFPA 机芯 (640 pixel \times 512 pixel, 17 μ m) 的耦合与成像,并提出一种前置偏振片偏振热成像系统修正模型,能够有效减小光路中偏振片的辐射和反射影响;

3) 研究了变积分时间条件下 IRFPA 非均匀性校正系数的变化规律以及积分时间自动选择方法等,研制了基于 256 \times 256 长波制冷 IRFPA 的超频 HDR 热成像实验系统,结合多积分时间图像融合-细节增强级联的 HDR 图像融合方法,实现了实时 HDR 热成像(延迟小于 40 ms,动态范围达 100 dB),能够正常观察和识别太阳光、干扰弹、火焰等强辐射背景下的目标;

4) 研究了仿生复眼热成像理论及技术,提出了“田”字型四孔径和“十”字型四/五孔径的视场部分重叠仿生复眼热成像模式,分别搭建了基于 640 \times 480 以及 80 \times 80 非制冷 IRFPA 的“田”字型四孔径紧凑型仿

生复眼热成像实验系统,实现了大视场搜索、中心视场高分辨成像的变空间分辨率成像,验证了仿生复眼热成像的特点及其有效性;

5) 提出热红外到可见光彩色图像的转换 TIV-Net 算法,完成了 75000 对图像数据集的搭建,并在车载和无人机等平台实现了不低于 20 Hz 的实时处理,证明通过深度学习方法可实现昼夜热图像向自然感彩色可见光图像的实时转化,有效提高人眼视觉通过热像仪的目标场景态势感知能力。

这些仅是当前迅速发展的热成像及其图像处理技术的冰山一角,充分说明通过对成像模式及其图像处理技术的深入研究,可获得一些新的认识和装备思想,提高热成像技术的研究和应用水平,促进技术的发展和装备的更新。这也是我们后续将继续深入研究和应用转化的重点内容。

致谢 本文的相关研究源自研究团队近年来的研究成果,其中范永杰、顿雄、金明磊、李亦阳、李硕、罗琳、刘志豪、袁盼、杨建国、盛典、王铭赫等博士(生),以及刘明聪、吴恒泽、陶星余、孙遵义、谭竹嫣、陈洁玲等硕士(生)的学位课题研究为本文提供了有益的信息,在此一并感谢!

参 考 文 献

- [1] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
Bai T Z, Jin W Q. Principle and technology of photoelectric imaging[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [2] 陈伯良. 红外焦平面成像器件发展现状[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 1-7.
Chen B L. Development state of IRFPA imaging device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1): 1-7.
- [3] 金伟其, 隋婧, 董立泉. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 70-75.
Jin W Q, Sui J, Dong L Q. Progress of researches in scene-based nonuniformity correction for IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 70-75.
- [4] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. Applied Optics, 1999, 38(5): 772-780.
- [5] Redlich R, Figueroa M, Torres S N, et al. Embedded nonuniformity correction in infrared focal plane arrays using the Constant Range algorithm[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69: 164-173.
- [6] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [7] Qian W X, Chen Q, Gu G H. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm[J]. Optical Review, 2010, 17(1): 24-29.
- [8] Li Y Y, Jin W Q, Li S, et al. A method of sky ripple residual nonuniformity reduction for a cooled infrared imager and hardware implementation[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1070-1087.
- [9] 冷寒冰, 易波, 谢庆胜, 等. 基于时域矩匹配的红外图像自适应非均匀性校正[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410003.
Leng H B, Yi B, Xie Q S, et al. Adaptive nonuniformity correction for infrared images based on temporal moment matching[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410003.
- [10] Ratliff B M, Hayat M, Hardie R. Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal plane arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4372: 114-124.
- [11] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration[J]. Applied Optics, 2000, 39(8): 1241-1250.
- [12] 刘崇亮, 金伟其, 范永杰, 等. 基于虚拟边框视场光阑的 IRFPA 自适应非均匀性校正算法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1159-1164.
Liu C L, Jin W Q, Fan Y J, et al. Infrared non-uniformity correction algorithm based on virtual perimeter diaphragm strips[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1159-1164.
- [13] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. Improved interframe registration based nonuniformity correction for focal plane arrays[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 263-269.
- [14] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [15] Zhang T X, Shi Y. Edge-directed adaptive nonuniformity correction for staring infrared focal plane arrays[J]. Optical Engineering, 2006, 45(1): 016402.
- [16] 刘秀, 徐超, 金伟其, 等. 基于帧间运动的神经网络非均匀性校正及其硬件实现[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(11): 1331-1335, 1349.
Liu X, Xu C, Jin W Q, et al. Neural network non-uniformity correction by means of frames motion estimation and its hardware implementation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(11): 1331-1335, 1349.
- [17] Rong S H, Zhou H X, Qin H L, et al. Guided filter and adaptive learning rate based non-uniformity correction algorithm for infrared focal plane array[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76: 691-697.
- [18] He Z W, Cao Y P, Dong Y F, et al. Single-image-based nonuniformity correction of uncooled long-wave infrared detectors: a deep-learning approach[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): D155-D164.
- [19] 赖睿, 官俊涛, 徐昆然, 等. 级联残差学习的红外图像非均匀性校正方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(1): 13-19.
Lai R, Guan J T, Xu K R, et al. Cascade residual learning method for infrared image nonuniformity correction[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(1): 13-19.
- [20] Högesten N. Scene based non-uniformity correction systems and methods: US7995859[P]. 2011-08-09.
- [21] 徐泽林, 路东明, 王利平, 等. 利用灰度差估计的条纹非均匀性校正方法[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0511001.
Xu Z L, Lu D M, Wang L P, et al. Fringe non-uniformity correction method based on gray difference estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0511001.
- [22] 王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
Wang X, Xia R Q, Jin W Q, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [23] 杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1511001.
Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1511001.
- [24] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [25] Gurton K P, Felton M, Mack R T, et al. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7672: 767205.
- [26] Gao S K, Gruev V. Gradient-based interpolation method for

- division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1137-1151.
- [27] 刘海峥, 史泽林, 冯斌. 微振动片阵列红外成像非均匀性产生机理及其校正[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 480-491.
Liu H Z, Shi Z L, Feng B. Mechanism and calibration of non-uniformity for IR polarization imagery obtained with integrated micro-polarizer array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 480-491.
- [28] Li J Y, Bao L, Jiang S, et al. Inverse design of multifunctional plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8375-8386.
- [29] 北方广微联合西工大推出非制冷红外偏振焦平面探测器[EB/OL]. (2018-08-18)[2023-03-15]. http://www.mems.me/mems/infrared_sensor_201808/6937.html.
North Guangwei Technology Inc. united Northwestern Polytechnical University to launch the uncooled infrared polarization focal plane detector[EB/OL]. (2018-08-18)[2023-03-15]. http://www.mems.me/mems/infrared_sensor_201808/6937.html.
- [30] 白丕绩, 姚立斌, 陈楠, 等. 像素级数字长波制冷红外焦平面探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2018, 40(4): 301-308.
Bai P J, Yao L B, Chen N, et al. Progress of pixel-ADC level digital long wave cooled infrared focal plane array detector[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(4): 301-308.
- [31] Richards A A, Cromwell B K. Extending IR camera scene radiance dynamic range with cyclic integration times[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5782: 93-99.
- [32] Richards A A, D'Souza S. A novel NIR camera with extended dynamic range[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6205: 62050G.
- [33] 洪闻青, 姚立斌, 姬荣斌, 等. 基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧方法[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1490-1500.
Hong W Q, Yao L B, Ji R B, et al. A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1490-1500.
- [34] 顿雄, 范永杰, 金伟其, 等. 制冷焦平面高动态范围热成像非均匀校正系数与积分时间的关系[J]. *兵工学报*, 2015, 36(5): 839-845.
Dun X, Fan Y J, Jin W Q, et al. Relationship between integral time and two-point non-uniform correction for HDR imaging of cooled focal plane array[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(5): 839-845.
- [35] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(11): 1806-1813.
- [36] 裘溯, 倪宇, 金伟其, 等. 基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3018-3025.
Qiu S, Ni Y, Jin W Q, et al. FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3018-3025.
- [37] Shankar M, Pitsianis N P, Brady D J. Compressive video sensors using multichannel imagers[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): B9-B17.
- [38] Shankar M, Willett R, Pitsianis N, et al. Thin infrared imaging systems through multichannel sampling[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B1-B10.
- [39] 宋岩峰, 郝群, 曹杰, 等. 大视场仿生复眼光电成像探测技术的研究发展[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 20210593.
Song Y F, Hao Q, Cao J, et al. Research and development of Wide-Field-of-View bionic compound eye photoelectric imaging detection technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20210593.
- [40] 罗琳, 杨建国, 裘溯, 等. 多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像理论与技术[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20210062.
Luo L, Yang J G, Qiu S, et al. Theory and technology of bionic thermal imaging with multi-aperture distributed and partially overlapped field of view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20210062.
- [41] 杨建国, 罗琳, 金伟其, 等. “十”字型四孔径视场部分重叠仿生热成像[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(9): 1019-1028.
Yang J G, Luo L, Jin W Q, et al. Bionic thermal imaging with cross-shaped four-aperture partially overlapped field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(9): 1019-1028.
- [42] Zhu J, Jin W Q, Li L, et al. Fusion of the low-light-level visible and infrared images for night-vision context enhancement[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1): 013501.
- [43] 刘佳妮, 金伟其, 李力, 等. 自适应参考图像的可见光与热红外彩色图像融合算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(12): 3907-3914.
Liu J N, Jin W Q, Li L, et al. Visible and infrared thermal image fusion algorithm based on self-adaptive reference image[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(12): 3907-3914.
- [44] 何炳阳, 张智途, 蒋晓瑜, 等. 共光轴实时彩色融合系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2854-2862.
He B Y, Zhang Z Q, Jiang X Y, et al. Real-time coaxial color fusion system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2854-2862.
- [45] 刘明聪. 红外热成像的高动态范围图像融合及可视化方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
Liu M C. High-dynamic-range fusion and visualization of thermal images[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.
- [46] Kuang X D, Sui X B, Liu Y, et al. Single infrared image enhancement using a deep convolutional neural network[J]. *Neurocomputing*, 2019, 332: 119-128.
- [47] Li S, Han B F, Yu Z J, et al. I2V-GAN: unpaired infrared-to-visible video translation[C]//Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia, October 20-24, 2021, Virtual Event, China. New York: ACM Press, 2021: 3061-3069.
- [48] Zhu J Y, Park T, Isola P, et al. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 2242-2251.
- [49] Kuang X D, Zhu J F, Sui X B, et al. Thermal infrared colorization via conditional generative adversarial network[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 107: 103338.
- [50] Jin M L, Jin W Q, Li Y Y, et al. Temporal high-pass non-uniformity correction algorithm based on grayscale mapping and hardware implementation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9622: 962210.
- [51] 袁盼, 谭竹嫣, 张旭, 等. 工业气体泄漏红外成像检测及差分光谱滤波检测方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20210714.
Yuan P, Tan Z Y, Zhang X, et al. Study on infrared imaging detection and differential spectral filtering detection method of industrial gas leakage[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210714.
- [52] Zhang X, Jin W Q, Li J K, et al. Minimum detectable gas concentration performance evaluation method for gas leak infrared imaging detection systems[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2952-2959.
- [53] Li S, Jin W Q, Xia R Q, et al. Radiation correction method for infrared polarization imaging system with front-mounted polarizer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26414-26430.
- [54] Liu M C, Li S, Li L, et al. Infrared HDR image fusion based on response model of cooled IRFPA under variable integration time[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 94: 191-199.
- [55] Tao X Y, Jin W Q, Yang J G, et al. Multi-integration time adaptive selection method for superframe high-dynamic-range infrared imaging based on grayscale information[J]. *Sensors*, 2022, 22(11): 4258.

- [56] Li S, Jin W Q, Li L, et al. Fusion algorithm based on grayscale-gradient estimation for infrared images with multiple integration times[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103179.
- [57] 王铭赫, 李硕, 金伟其, 等. HDR 热成像系统动态范围特性测试评价方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210526.

Wang M H, Li S, Jin W Q, et al. Testing and evaluation method for HDR thermal imaging system dynamic range performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210526.

Research and Application of Thermal Imaging Mode and Image Processing Technology

Jin Weiqi*, Li Li, Wang Xia

Key Lab of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Significance Infrared thermal imaging technology has a wide range of applications in military and civilian fields, and real-time digital image processing, as a key link of infrared imaging systems, has become an important part of thermal imaging technology research in China and abroad. With the development of infrared focal plane detectors (IRFPA) and intelligent image processing technologies, new thermal imaging modes and corresponding image processing methods have been continuously innovated, which have achieved some effective results.

Progress We review the research and application of the research team in the new thermal imaging modes and their image processing technologies. 1) The non-uniformity correction (NUC) method combining scene-based time-domain high-pass and air-domain low-pass filtering, namely ITHP & GM is proposed, which can effectively correct the "water streak" non-uniformity noise that the existing algorithm fails to effectively deal with, and the algorithm transplantation has been realized on the FPGA hardware platform and applied in a mid-wave infrared cooling thermal imaging camera. 2) The focal plane infrared polarizer arrays with 4-polarization and 3-polarization +1 intensity division are designed and developed, and the coupling and imaging with the refrigerated MW-IRFP movement (320 pixel×256 pixel, 25 μm) and the uncooled LW-IRFPA movement (640 pixel×512 pixel, 17 μm) are realized. A correction model of the front polarizer-based polarization thermal imaging system is proposed, which can effectively reduce the radiation and reflection effects of the polarizer in the optical path. 3) The overclocked high dynamic range (HDR) thermal imaging experimental system based on 256×256 long-wave IRFPA is developed and combined with the HDR image fusion method of multi-integration time image fusion-detail enhancement cascade, and real-time HDR thermal imaging (with delay less than 40 ms) is realized, which can normally observe and identify targets under the background of strong radiation such as the sun, jamming bombs, and flames. 4) The bionic compound eye thermal imaging mode with the partially overlapped field of view of four apertures and four/five apertures is proposed, and the experimental system of four-aperture bionic compound eye thermography based on 640×480 and 80×80 uncooled IRFPA is built, which realizes variable spatial resolution imaging with a large field of view searching and high-resolution imaging of central field of view and verifies the characteristics and effectiveness of bionic compound eye thermography. 5) The TIV-Net algorithm for the conversion of thermal infrared to visible color images is proposed. 75000 pairs of image datasets are completed, and the real-time processing that is not less than 20 Hz is realized on platforms such as vehicle platforms and drones. The real-time conversion of day and night thermal images to natural color visible light images through deep learning methods is proven, which effectively improves the situational awareness ability of day and night human eye vision through thermal imagers.

Conclusions and Prospects The research progress of the research team in new thermal imaging modes and image processing technologies is reviewed, including the NUC method combining scene-based time-domain high-pass and airspace low-pass filtering, correction model of division of focal plane infrared polarizer arrays based on infrared polarization imaging, front polarizer-based polarization thermography system, overclocking HDR thermal imaging experimental system of long-wave IRFPA, bionic compound eye thermal imaging mode and its experimental system with the partially overlapped field of view of four apertures and four/five apertures, TIV-Net algorithm converting thermal infrared to visible color images, etc. Such technology research has made innovative technological breakthroughs or has been applied, showing a wide range of application prospects, which can be an important direction for further research and expansion.

Key words image processing; thermal imaging; high dynamic range; polarization imaging; bionic compound eye; colorization