

文章编号:1001-5078(2025)03-0444-08

· 图像与信号处理 ·

面向红外测温的双波段图像融合人脸检测方法

李涵钰, 李希才

(南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了提高红外热像仪人脸检测准确度, 本文提出了一种基于双波段图像融合的人脸检测方法, 该方法将可将光(RGB)图像和红外(IR)图像经线性融合后, 通过 Yolo-FastestV2 轻量级卷积神经网络进行人脸检测。相较于传统的红外测温系统中需要分别对红外和可见光图像分别进行人脸检测, 本文提出的双波段人脸检测方法仅需要进行一次检测即可同时获得 IR 图像和 RGB 图像中的人脸位置, 并减少了传统方法在坐标映射阶段由于距离变化而引入的映射误差。为了完成对双波段融合图像的训练和测试, 设计了包含可见光和红外的双波段图像数据集, 数据集采用双波段相机进展拍摄, 该摄像机由可见光传感器和红外探测器组成, 可同时采集 RGB 图像和 IR 图像。实验结果表明, 利用双波段融合的方法能够正确检出测试集中 94.35% 人脸图像, 最高检测帧率可达 317 FPS。

关键词: 双波融合; 红外人脸检测; 深度学习

中图分类号: TP391; TN291 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.019

Dual-band image fusion face detection for infrared temperature measurement

LI Han-yu, LI Xi-cai

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of face detection of infrared thermal imaging cameras, a face detection method based on dual-band image fusion is proposed, which can perform face detection through Yolo-FastestV2 lightweight convolutional neural network after linear fusion of visible light (RGB) images and infrared (IR) images. Compared with the traditional infrared temperature measurement system that requires separate face detection for infrared and visible images, the dual-band face detection method proposed in this paper requires only one detection to obtain the face position in both IR and RGB images, and reduces the mapping error introduced by the traditional method due to the distance change in the mapping process in the coordinate mapping stage. In order to complete the training and testing of dual-band fusion images, a dual-band image dataset containing visible light and infrared, and the dataset is shot by a dual-band camera, which consists of a visible light detector and an infrared detector, and the two sensors can simultaneously capture RGB images and IR images. The experimental results show that 94.35% of the face images in the test set can be correctly detected using dual-band fusion, and the highest detection frame rate can reach 317 FPS.

Keywords: image fusion; face detection; deep learning

基金项目: 国家科技部重点研发计划项目 (No. 2022YFB3606600); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No. 2024300443) 资助。

作者简介: 李涵钰 (2003 -), 女, 硕士, 目前研究基于嵌入式的图像处理。E-mail: 211180125@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 李希才, 副研究员, 从事立体成像与计算机视觉方面的理论基础和工程应用研究。E-mail: lixcai@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-06-13; **修订日期:** 2024-08-02

1 引言

体温是衡量人体健康状况的重要指标,病毒携带者的早期临床表现以发热为主^[1-2],为了防止病毒进一步扩散,需要进行准确又快速的病人分诊,因此在人员密集场合需要及时利用测温仪器快速筛选出人群中的发热个体^[3-4]。根据测量方式的不同,体温计分为接触式温度计和非接触式两类,水银温度计是最为经典的体温计,其测温精度能够达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5],价格低廉且操作方式简单。但水银温度计测量时间长、测量范围窄、不易读数,此外水银温度计的材质为玻璃,导致温度计容易破碎并泄露出其中的有毒成分汞,潜在使用危险^[5-6]。

非接触式测温仪通常采用红外热辐射原理进行测温^[7],具有材质安全、测温响应速度快、具备数字存储或语音播报等优点,在大型流感爆发时期可以减少不同个体之间的交叉传染的机会,从而得到了广泛的应用。目前市面上常见的非接触式测温仪有红外耳温计和红外额温枪。但这种红外测温仪只能实现单点测温,无法实时成像,难以适用于人群体温测量^[8]。同时这种测温仪器容易受测温距离^[9]、操作方式等因素的干扰,加上传感器的灵敏度因素,综合导致测温结果的精确度相比水银温度计低^[5]。

热像仪是非常有前景的一种非接触式测温方式,利用红外热成像的测温方法实现大面积、多目标的同步监测,可降低大规模体温检测造成的人员滞留现象,对降低疾病传染风险有一定的好处,是当前公共场所快速甄别发热个体的方式。文献[10]提到2003年Wang Xiaoyu等人在SARS病毒的爆发期间采用红外相机对人脸进行自动高温筛查,基于SVM红外人脸检测讨论了SVM与红外图像识别的固有的一致性并实现了一种在红外视频中自动检测人脸并进行温度测量的智能识别系统,但是其只能在服务器上运行。在文献[6]~[11]中,国内外已经基于红外测温提出了许多应用模型,但精准快速地测量目标温度仍然是一个具有挑战性的问题,仍然需要分别对红外和可见光图像分别进行检测。红外测温相机的精度不仅会受到外部环境因素的影响,还依赖于相机的人脸检测准确率,人脸检测精度与红外相机的分辨率也息息相关。

低分辨率红外图像对模糊的目标检测存在一定的困难,诸如误将远处的热源如显示屏或者举起的拳头等误检为人脸,可见光图像人脸检测也存在着

诸多不足,一方面是容易受到光照的影响,在测温系统的部署场景中不可避免的会触及到环境光照变化,太阳直射,光照不均匀或者黑暗环境等。在一些极端环境或者视场范围内存有伪装人脸,会出现漏检或将伪装人脸检测处理,并对伪装人脸加以测温,导致测温异常。针对上述现象,本文提出了一种将融合红外和可见光图像的双波段人脸检测方法,综合了热成像和可见光图像的优势^[12],有效地提高了红外测温应用中人脸检测的准确率,可以兼顾不用的使用环境。

目前绝大多数双波红外测温系统中,为了方便进行人脸检测采取先在可见光图像中采用较为成熟的人脸检测算法进行人脸定位,然后将检测到的人脸坐标位置映射到与之对应的红外图像中。这种方法除了具有单波段人脸检测的不足之外还具有坐标映射不准确、计算耗时长、帧率低等不足。有研究者采用先通过红外图像进行粗筛选,然后再在可见光图像中进行人脸的精细定位,该方法的不足是算法的计算量较大,而且容易受到环境光照等因素的影响。文献[13]中作者所在团队于2019年提出了一种眼定位系统,利用YOLO-V3神经网络定位IR图像的人脸面积,并将该区域映射到RGB图像上,在RGB感兴趣区域内完成人眼定位并对RGB区域内的双目立体图形进行模板匹配,实现快速立体视觉测距。

目前基于深度学习神经网络的测温相机人脸检测算法多依赖高端的GPU才能达到实时测温的效果,因此在边缘终端实现实时人脸检测也是本文研究的重点之一。文献[14]中2020年张洁茹团队基于Faster-CNN的Two-Stage算法建立了双光谱测温管理系统,Faster-CNN^[15]属于Two-Stage算法,检测速度相对较慢。文献[16]中张骏团队于2021年基于MobileNet-SSD^[17]实现了双光融合的红外人脸检测算法。本文着眼于轻量级神经网络Yolo-FastestV2对双波段融合图像进行人脸检测。该网络由于足够小,因此能够保障高实时推理性能,且占用较低的CPU使用率,因此该模型可部署在树莓派等轻量级嵌入式ARM设备上,降低了测温相机的生成成本。

为了验证本文提出的双波段人脸检测方法的有效性和测温精度,根据团队于2021年提出的一种双目视觉系统的校准方法^[18]设计了一种能融合IR图像和RGB图像的双波段测温相机。测温相机由相机驱动板、液晶显示屏以及一个树莓派4主板组成,可

可见光摄像 CMOS 传感器和红外探测器集成在相机驱动板上,可以同时采集 RGB 图像和 IR 图像。为了完成对双波段人脸检测网络的训练和测试,本文利用该摄像机拍摄了一个 IR 图像与 RGB 图像一一对应的双波段数据集。实验结果表明该方法具有较好的人脸检测精度和速度,同时也展现了通过双波段融合有利于对抗一些黑暗环境和不同光照变化的环境干扰。

2 双波段融合测温系统框架

目前面向可见光的人脸检测技术已较为成熟,因此传统的双波段测温流程如图 1(a)所示:先利用卷积网络定位出 RGB 图像的人脸位置,再将该区域映射到对应的 IR 图像中,有的会在感兴趣区域内进一步根据形态学算法更加准确地定位人脸位置,大多数则直接在映射区域内进行测温。这种策略会导致两种误差:一是映射阶段,可见光图像映射到红外图像映射不准确,导致测温区域出现偏差,从而引起测温误差。另一方面可见光的人脸检测容易受到环

境影响,在黑暗或强光照的场景人脸检测容易失效,并且会将伪装人脸的照片等错误识别为人脸。

红外图像分辨率低,容易将拳头等圆形物体误检为人脸,但包含热成像信息、能够解决可见光图像受到光照影响的问题。因此考虑将可见光图像和红外图像进行融合,一方面可以实现信息互补,形成包含信息更加丰富,另外双波段的融合也将更有利于定位人脸位置的图像。本文提出的双波段融合图像人脸检测方法如图 1(b)所示:将红外图像视为一灰度值相同的三通道 RGB 图像,根据权重将三通道进行合并。融合后的图像包括可见光信息和红外信息,然后将图像送入 Yolo-FastestV2 轻量级卷积神经网络进行人脸检测即可得到两个图像中的人脸位置。相比传统的方法,不仅减少了从可见光图像映射到红外图像这个环节,改善了传统双波人脸检测方法映射不准确的问题,同时提高人脸检测准确度,而且可以减少一次网络训练时间,提高计算效率。



图 1 双波段融合测温方法对比

Fig. 1 Comparison of two-band fusion temperature measurement methods

3 双波段融合测温系统设计

3.1 双波段测温相机硬件设计

双波段测温相机如图 2 所示,相机集成了一颗低分辨率的 IR 探测器和一颗高分辨率的 RGB 传感器,另外还包括电源模块、一个液晶显示屏以及树莓派核心板。相机驱动板可以同时驱动红外和可见光摄像模组工作,确保红外和可见光的图像大致处于相同的视场范围内。相机驱动板为传感器正常工作提供必须的工作电压和驱动时钟,同时衔接传感器和 CPU,为两者间互相通信提供相应的接口。电源管理模块包括电池、充电和放电管理电路,为整个系

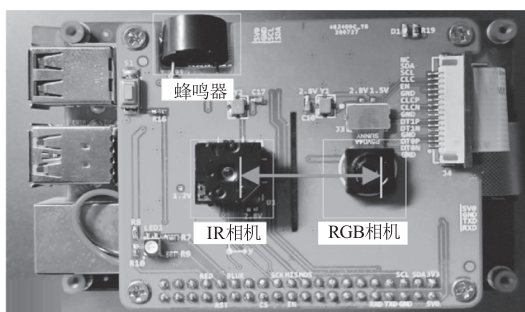
统提供工作电压。液晶显示屏的尺寸为 5.5 in,用于显示测量信息并可以通过触摸屏与系统进行交互,可对测温相关的参数进行设置以及控制相机拍照等功能。整个测温相机所涉及到的图像采集、图像融合、人脸检测和测温等图像处理任务均在树莓派中完成,其 CPU 主频为 1.5 GHz,内存为 4 G。相机模组和树莓派之间通过 MIPI 接口进行通信,液晶显示屏和树莓派之间同样通过 MIPI 接口相连,输出接口除了连接液晶显示屏的 MIPI 接口外还可以通过 HDMI 接口输出测量信息,用户还可以通过鼠标和键盘与测温相机相连,并通过 USB 接口进行数据

的拷贝等交互任务,考虑到远程维护等应用双波段图像还可以通过千兆以太网接口上传到服务器,实现远程的检测和控制。

表 1 两种相机的参数

Tab. 1 Parameters of cameras

参量	红外探测器	可见光传感器
型号	Lepton 2.5	OV5647
分辨率/pixel	80 × 60	1280 × 720
帧率/fps	9	60
视角	51°'63.5°	75.7°'62.2°
灵敏度/mK	< 50	/
波长范围/mm	8 ~ 14	380 ~ 1060
焦距/mm	5	3.60



(a) 测温相机驱动板



(b) 测温相机显示屏

图 2 双波段测温相机

Fig. 2 Dual-band temperature measuring camera

3.2 双波段人脸检测网络设计

随着计算机视觉与目标检测算法的不断发展,人脸检测算法主要分为两类,一种是以 Faster-RCNN 为代表的两阶段(Two-Stage)算法,先生成一系列可能包含目标物体的候选框,然后在候选区域进行进一步的定位,之后通过卷积神经网络进行目标物体的分类,这种算法具有更高的目标检测精度,但 Two-Stage 算法的计算速度低。另一类则是单一阶段(one-stage)算法,比如 SSD 与 YOLO 系列,one-stage 算法利用回归的算法思路进行目标检测,因此检测速度更快。为了降低测温相机的生成成本以及更便捷部署,测温相机的人脸检测算法需要部署在树莓派这种低功耗的设备上,因此进行人脸检测的算法需要满足:

(1)具有较高的目标检测与人脸定位精度,计算速度快以保证人脸检测与测温的实时性;(2)是轻量级算法,能在树莓派 CPU 上流畅运行。早期轻量级目标检测中使用 Mobilenet SSD,但在实际测试中难以在常见的 ARM 设备上实现实时性;因此本文采用了实时性更强、运算速度经过优化的轻量级卷积神经网络 Yolo-fastestV2,网络结构如图 3 所示。

Yolo-fastestV2 专注于实时推理性能和实时条件下的低 CPU 使用率,在保持高效的检测性能情况下,减少了卷积层的数量,大大降低计算复杂度。因此 Yolo-fastestV2 可以在树莓派等低功耗 ARM 设备上运行并满足一定的实时性。当用户面部距离相机约 1 m 时,面部边界框大小约为 160 × 160,因此网络输入图像大小设置为 320 × 240,经过四次下采样和一次上采样,最终输出网格大小为 20 × 20 的特征向量。输出特征图通道数为 18,其中人脸类别所占通道数为 5,剩下特征通道数留给之后的扩展,以对其他类别物体检测进行网络训练。

3.3 图像融合

3.3.1 视差与面积距离估计方法探索

为了解决热辐射随着距离衰减的问题,我们采用双波段数据集并融合人脸面积实现距离的估计,我们对不同距离下双波段人脸框进行了拟合,我们的基本思想是将红外和可见光相机视为一对双目相机(其中可见光相机为左相机,红外相机为右相机),我们就可以将人脸定位的过程近似地视为传统双目视觉中的立体匹配过程。在人脸定位较为精确的情况下,人脸的位置即为双目相机中的同名点区域。视差与距离间的关系如图 4 所示:当拍摄距离 50 cm 时,IR 图像中人脸中心点的横坐标为 0.390625,RGB 图像中人脸中心点的横坐标为 0.435973;当拍摄距离 300 cm 时,IR 图像中人脸的中心点横坐标为 0.473488,RGB 图像中人脸的中心点横坐标为 0.476562。视差的存在导致融合图像中的可见光人脸与红外人脸不能完全重合在一起,那么经过网络后的人脸标签也不会完全重合,因此在一定程度的视差有利于我们人脸检测结果的可视化。

视差与面积距离估计步骤具体如下:利用测温相机拍摄出被测目标不同距离(50 ~ 170 cm)下的图像,标记出每个距离下 RGB 图像与 IR 图像的人脸面积框,测出两张图像的人脸面积大小以及人脸中心的 X 坐标,X 坐标的差值即该距离下的视差。将两者进行拟合,结果如图 5 所示。

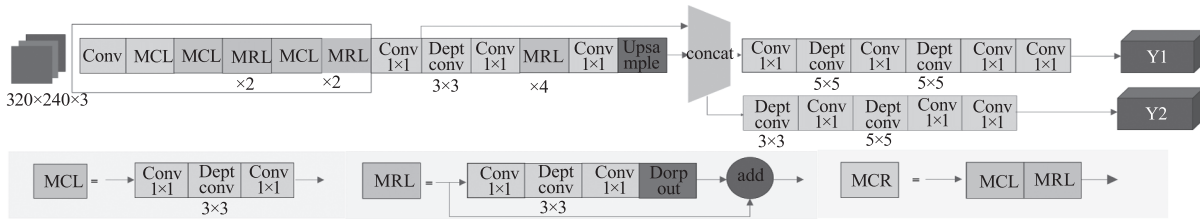


图3 Yolo-fastestV2 网络结构

Fig.3 The network structure of Yolo-fastestV2

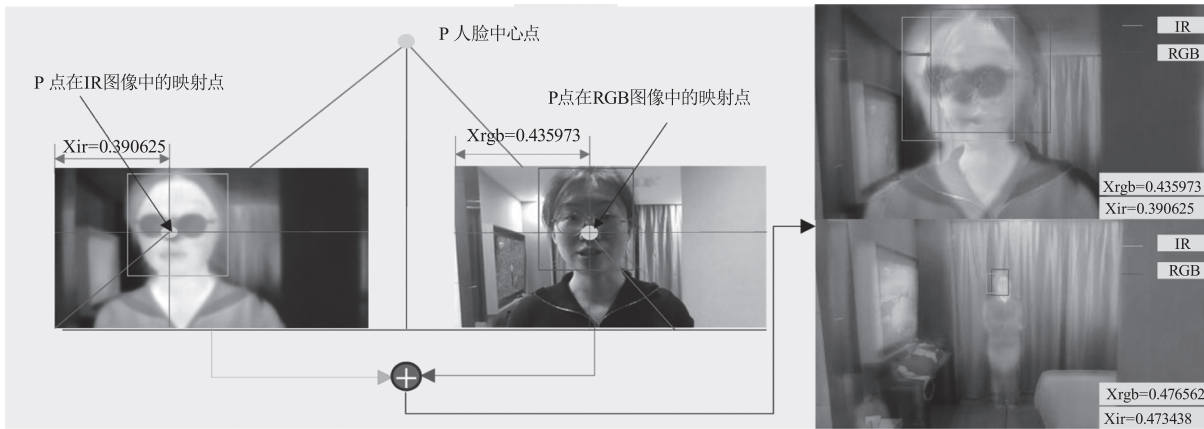


图4 双目立体视觉视差原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of binocular stereo vision parallax principle

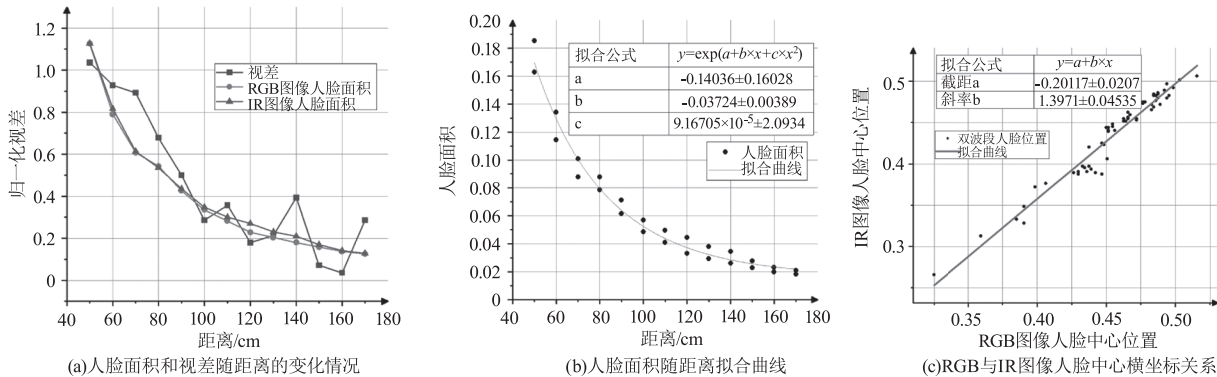


图5 视差与人脸面积测试结果

Fig.5 Parallax and face area test results

在图5(a)中黑色折线表示归一化视差,不同折线分别表示RGB图像与IR图像人脸面积,在距离较大时,视差的测量结果会有所波动,该图为手动标定人脸框引入的误差,在可接受范围内,总体趋势为视差随着距离增大而减小。根据这一结果拟合出人脸面积随距离变化关系,如图5(b)中“拟合”曲线所示,因此在进行人脸检测时便能够根据人脸面积的大小估算出拍摄距离,从减小测温时由于热辐射随着距离衰减的导致测温误差,完成测温结果对测温距离的修正。图5(c)中,纵横坐标轴分别代表RGB图像与IR图像人脸中心位置的X,图中每个黑点都代表了双波段图像中的一对人脸位置,这些点通过线性回归能够拟合成

一条直线,这一结果与双目相机的立体视觉原理是相吻合的。

3.3.2 图像融合

本文采用线性融合方法,将红外图像视为一个灰度值相同的三通道RGB图像,将本文的双目视觉系统采集的图像进行融合。融合方法采用线性混叠,线性混叠融合方法可以用等式表示:

$$g(x) = (1 - \alpha)f_{ir}(x) + \alpha f_{rgb}(x) \quad (1)$$

其中, α 表示图像的权重; $f_{ir}(x)$ 和 $f_{rgb}(x)$ 分别表示IR图像和RGB图像,融合效果如图6所示。

采用不同的权重,对应的图像融合效果也不尽相同,分别尝试了图像权重值 α 从0到1的不同数值变化,计算不同 α 时IR图像和RGB图像的峰值信噪比

(PSNR 代表图像的质量),并观察对比融合图像的直观效果。当 α 为 0.2 ~ 0.8 时 RGB 图像与 IR 图像 PSNR 值相近,而对于我们的双目系统,IR 图像具有更高的对比度,当 IR 图像的权重值稍高时,融合图片的人脸更加清晰。因此,本文为了很好地保留 IR 图像和 RGB 图像的细节,将 IR 图像和 RGB 图像的权值分别设置为 0.7 和 0.3(即 $\alpha = 0.3$)。



图 6 IR 图像和 RGB 图像的融合图像

Fig. 6 The fusion effect of IR image and RGB image

3.4 数据集设计

深度学习网络需要大量的数据进行训练和测试,本文提出的红外测温系统图像数据集较为特殊,需包含多个目标配对的 RGB-IR 图像对。

双波段图像数据集设计分为数据集设计、标签设计、数据融合几个步骤。用上述的双波段测温相

机拍摄一一对应的 IR 图像和 RGB 图像对,其中 IR 图像的分辨率为 320×240 ,RGB 图像为 640×480 。再分别对红外图像和可见光图像进行人脸标注,两张图像的人脸标注也应该是互相对应的,我们对图像中背对的脑袋不予标记,仅对正面朝着拍摄者的图像进行标记。人脸标注完成后,再将 IR 图像和 RGB 图像的标签进行融合,也就是将红外和可见光数据集中两个独立的 txt 文本融合为一个文本,文本中每一行代表一个类别,共包含红外图像中的人脸和可见光人脸两个类别。

该数据集总共由 4000 对图像组成。数据集被分成 3000 对训练集,500 对验证集和 500 对测试集。我们通过拍摄多位同学不同的照片,组成了 8 个不同的组,其中 6 个组组成了训练集。其余 2 组分别组成验证集和测试集。因此,训练集中的数据不会出现在验证或测试集中,以避免由于过拟合导致的模型性能膨胀。训练卷积神经网络需要各种不同的人脸情况。如图 7 所示:该数据集拍摄了包含了 1 到多张不同目标人脸,以及距离摄像头远近不同等变化条件的图像,就人脸个数而言,在一组数据中,大约 20 % 的图片有一个目标,40 % 包含两个目标,其余的图片包含不少于三名目标。在距离方面,观众没有固定的位置或距离,观众的距离是不同的,其中 9 % 在 1 m 以内,34 % 在 1 m 到 2 m 之间,其余在 2 m 以上。



图 7 双波段人脸数据集

Fig. 7 Dual-band face dataset

数据集是在真实生活场景下的室内获取,人脸的状态是各不相同的,比如人脸因遮挡不全、戴帽子或者戴口罩遮挡、不是正面对镜头等。这些复杂的情况都对 Yolo-fastestV2 进行人脸识别带来了极大的挑战。对于每一组图像来说,拍摄一张基础的图像,即所有目标都面对着近距离的镜头。其他图像包含一个或多个上述的情况,例如两位被拍摄者面对不同方向且离摄像头距离不同,这样该数据集就构成了一个比常规的双波段图像数据集更复杂的图像数据。

4 双波段融合红外人脸检测实验

为了验证本文所提出的双波段测温相机中人脸检测的精确度和人脸漏检误检情况,在不同场景下进行了测试,采用上文所述的图像数据集对 Yolo-fastestV2 进行训练后测试,并将可见光图像中检测到的人脸框的标签设置为蓝色框,红外图像中检测到的人脸框的标签设置为紫色框。若检测出两个人脸框则表明是人脸的概率更大,同时人脸检测框上方的数值越大说明是该区域是人脸的概率越高,其最大值为 1。

将不同场景下的融合图像送入 Yolo-FastestV2 网络中进行测试,验证该网络能否检测出各种情况下的人脸,测试结果如图所示,第一行为可见光图像的人脸检测结果,第二行为红外图像中的人脸检测结果,第三行为融合图像的检测结果。图 8(a)为单人正脸图像,单波段和融合图像检测结果均有很高

的检测得分。同时也没有将融合图像环境中的显示屏和发热的水杯等误检为人脸;图 8(b)在单波段图像均未检测出来远处的微弱的人脸,但经过融合后能够顺利地检测出后方的人脸目标,且置信度较高。同时正面的人脸目标有口罩遮挡物,这是在检测发热人群的常见人脸干扰项,融合的红外和可见光图像中均可顺利检测出对应的人脸框;图 8(c)为单人正脸的图像,并没有出现将拳头误检为人脸;图 8(d)为有干扰的测试。测试者手持打印的伪人脸照片,打印的人脸照片包含 RGB 图像的特征,但没有 IR 人脸的特征,RGB 图像检测出了测试者人脸、照片伪人脸和后方人脸三个目标,IR 图像并未检测出照片人脸、同时后方的弱小人脸也未能检测出来,而融合图像检测结果不但能将较近的人脸检测出来,同时远处的暗弱人脸也能顺利地检测出来,并对应着 RGB 和 IR 两个人脸框,但是打印的照片中仅检测出了 RGB 人脸框;图 8(e)为暗光场景下的双人人脸检测实验,其中一人面部戴有口罩,均同时检测出了两个人脸框;图 8(f)组为三个不同大小的正脸人脸目标,其中一个人脸戴上口罩遮挡物,RGB 图像出现了误检情况,三个人脸目标均同时检测出了两个人脸框。上述的实验结果均表明融合图像的检测结果相比单波段图像的检测结果更准确,出现误检漏检的情况少,融合图像拥有更多的可识别信息,为



图 8 双波段融合图像人脸检测结果

Fig. 8 Face detection results of dual band fusion images

5 结论

(1) 本文提出了一种融合可见光与热红外的双波段人脸检测方法,并搭建了双波段测温硬件系统,该系统将目前的双阶段多任务人脸定位问题合并融

合为单一阶段的视觉任务,不仅可以很好地解决多阶段人脸定位中多人脸的多检漏检现象,而且兼顾了不同光照条件。

(2) 文本使用 one-stage 轻量级卷积神经网络

Yolo-fastestV2 进行人脸定位,为了训练网络并测试 Yolo-fastestV2 的融合图像人脸检测精度,论文设计了一个双波段多人脸数据集,数据集包含 4000 对红外与可见光图像,涵盖了不同目标个数、不同拍摄距离。经过网络训练与人脸检测实验, Yolo-fastestV2 在保持高效的检测性能条件下具有较低的 CPU 使用率。网络成功部署在轻量级的 ARM 设备树莓派上,不但降低了非接触式双波段测温相机的生成成本,同时方便携带且功耗低。

参考文献:

- [1] TAN J H, Ng E Y K, ACHARYA U R, et al. Infrared thermography on ocular surface temperature; a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(4): 97108.
- [2] POTTER, PATRICIA A, POTTER P A, et al. *Fundamentals of nursing, concepts, process and practice* [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 1985.
- [3] GAO T, WHITE D. A next generation electronic triage to aid mass casualty emergency medical response[J]. *Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, 2006, (Suppl): 6501 – 6504.
- [4] CHRISTIEN V D L M, MEESTER BEAM, NAOMI V D L. Emergency department crowding affect triage processes [J]. *International Emergency Nursing*, 2016, 29: 27 – 31.
- [5] WANG G J, WANG W D, LI K Y, et al. A digital thermometer with fast response and high precision [C] // 2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). IEEE, 2014.
- [6] BLUMENTHAL I. Should we ban the mercury thermometer? Discussion paper [J]. *J R Soc Med*, 1992, 85(9): 553 – 555.
- [7] TEUNISSEN L P J, DAANEN H A M. Infrared thermal imaging of the inner canthus of the eye as an estimator of body core temperature [J]. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2011, 35(3 – 4): 134 – 138.
- [8] Yuan Haoqi. The design of image fusion temperature detection system based on floating population [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019. (in Chinese)
袁浩期. 基于图像融合的流动人群体温检测系统设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [9] YUAN B, GONG P, XIE L, et al. An empirical method for improving accuracy of human eye temperature measured by uncooled infrared thermal imager [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(9): 59 – 64.
- [10] Xiaoyu W, Jihong C, Pingjiang W, et al. Infrared human face auto locating based on SVM and a smart thermal biometrics system [C] // International Conference on Intelligent Systems Design & Applications. IEEE Computer Society, 2006.
- [11] Zheng K K, Dong R, Wang H, et al. Infrared assessment of human facial temperature in the presence and absence of common cosmetics [J]. *Med Rxiv*, 2020; 13: 20034793.
- [12] Yu R X, Chen W Y, Zhou D M. Infrared and visible image fusion based on gradient transfer optimization model [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 50091 – 50106.
- [13] LI X C, WU Q Q, Xiao B P, et al. High speed and robust infrared-guiding multiuser eye localization system for autostereoscopic display [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(14): 4199 – 4208.
- [14] Zhang Jieru, Su Feng, Yuan Peijiang, et al. Dual-spectrum intelligent temperature detection and health big data management system [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(9): 1739 – 1746. (in Chinese)
张洁茹, 苏峰, 袁培江, 等. 双光谱智能体温检测与健康大数据管理系统 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(9): 1739 – 1746.
- [15] Ren S, He K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [C] // NIPS. 2016.
- [16] Zhang Jun, Zhu Bin, Ji Tao. Infrared face detection algorithm based on mobileNet-SSD [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 107 – 113. (in Chinese)
张骏, 朱标, 吉涛. 基于 MobileNet-SSD 的红外人脸检测算法 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(1): 107 – 113.
- [17] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD single shot multiBox Detector [M]. LEIBE B, MATAS J, SEBE M, et al. *Computer Vision ECCV 2016*, Cham: Springer, 2016.
- [18] LI X C, WU Q Q, WANG Y Q. Binocular vision calibration method for a long-wavelength infrared camera and a visible spectrum camera with different resolutions [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3855 – 3872.