

ARTICLE



基于拮抗特性模型的夜视微光图像与红外图像彩色融合

曹欣然¹, 马慧璿^{2,*}¹厦门大学, 航空航天学院, 厦门 361102²北京工商大学, 计算机与人工智能学院, 北京 100048

学术编辑: Shenglun Yi; 收稿日期: 2024-03-16; 录用日期: 2024-05-21; 发布日期: 2024-05-28

*通讯作者: 马慧璿, mahuijun@th.btbu.edu.cn

文章引用

曹欣然, 马慧璿. 基于拮抗特性模型的夜视微光图像与红外图像彩色融合. 人工智能前沿与应用, 2024, 1(1): 45-53.

Citation

Cao, X., & Ma, H. (2024). Color fusion of night vision and light images with infrared images based on antagonistic characteristic model. *Frontiers and Applications of Artificial Intelligence*, 1(1), 45-53.

© 2024 The Author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.


摘要


融合可以有效地利用可见光图像的色彩信息得到较好的可视效果, 又可以充分利用红外图像获得人眼无法观察到的红外信息, 具有广阔的应用前景。论文首先采用拮抗特性模型中的中心-周边对抗网络对红外与微光图像进行增强, 利用区域生长方法对增强后红外图像进行分割, 根据分割后各区域亮度得到目标图像。在融合阶段加入两种融合运算: 采用选择运算将目标图像信息融合到增强后微光背景中作为亮度通道的输入; 利用拮抗特性模型将经采用区域生长法得到红外图像和增强后的微光图像进行融合, 作为饱和度通道的输入。同时, 直接将增强的微光图像送入调色通道, 作为彩色融合图像的背景进行调色, 最后通过彩色重映射并加以显示。实验结果获得的图像具有较好的目标指示特性, 色彩更适合人眼观察, 有利于提高对目标情景的感知能力。

关键词: 计算机视觉, 特征跟踪, 光流法, 视觉特征, 视觉跟踪

Color fusion of night vision and light images with infrared images based on antagonistic characteristic model

Xinran Cao¹ and Huijun Ma^{2,*}¹School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China²School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Academic Editor:  Shenglun Yi; Submitted: 2024-03-16; Accepted: 2024-05-21; Published: 2024-05-28

*Correspondence Author:  Huijun Ma, mahuijun@th.btbu.edu.cn

Abstract

Fusion can effectively use the color information of visible light images to get a better visual effect, and can make full use of infrared images to obtain infrared information that cannot be observed by human eyes, which has a broad application prospect. The paper first uses the center-periphery antagonistic network in the antagonistic characteristic model to enhance the infrared and low-light image, uses the regional growth method to segment the enhanced infrared image, and obtains the target image according to the brightness of each region. In the fusion stage, two fusion operations are added: the selection operation is used to fuse the target image information into the enhanced light background as the input of the brightness channel, and the infrared image and the enhanced light image are merged by using the antagonistic characteristic model as the input of the saturation channel. At the same time, the enhanced low-light image is directly sent into the color modulation channel, used as the background of the color fusion image, and finally through the color remapping and display. The images obtained by the experimental results have better target indication characteristics, and the color is more suitable for human eye observation, which is conducive to improving the perception ability of the target scene.

Keywords: Computer vision, feature tracking, optical flow method, visual features, visual tracking

1 序言

在人类从外部世界中获得的信息中,视觉获取占 83%,而摄像机是机器视觉获取的方式,能够得到大量的信息,如交通环境、监控环境等。在可见光图像中,高频成分占较多部分,在一定照度下,它能反映场景的细节,但光照亮度不足的时候,可见光图像因为较低的对对比度就不能很好的反映场景的细节;红外图像根据其成像原理是一种辐射图像,根据目标与背景的温度差别生成其图像灰度值,因此它所反映场景不是真实的。因此,将二者进行融合可以有效地利用可见光图像的色彩信息得到较好的可视效果,又可以充分利用红外图像获得人眼无法观察到的红外信息 [1-4],具有广阔的工业应用 [16-27] 前景,近年来已经成为图像融合的热点研究问题。

目前的研究成果中,融合方法主要有像素级融合 [5]、基于统计的方法 [6]、压缩传感 [7]、变换域方法 [8-10],这些方法充分地利用红外图像的信息可见光图像与红外图像的融合。基于生物拮抗视觉特性方法近年来成为图像融合一种重要方法,它通过建立生物视觉模型,利用其兴奋与抑制的关系对图像进行不同的处理,得到综合不同图像的信息特征的目的。但目前的方法只能得到具有灰度值的融合图像,不利于视觉观察。本文在融合过程中加入了颜色通道,目的在于使融合的图像具有良好的目标视觉效果。

在当前夜视技术中,主要采用微光成像和热红外成像两种手段。单独使用微光成像或热红外成像系统通常难以同时兼顾场景细节表现能力和目标探测性能。然而,微光成像能够捕捉到低光环境下的细微场景信息,而热红外成像侧重于基于温差的目标检测,两者在信息上具有互补性。鉴于此,朱进开展了基于梯度域引导滤波 (Gradient Domain Guided Filtering, GDGF) 的图像细节增强方法的研究 [11]。该方法通过优化图像的梯度信息来增强低照度图像的细节,使得在光线不足的条件下也能够清晰地展现场景内容。

另一方面,张阵则专注于红外与微光图像的仿生增强算法研究 [12]。通过模仿生物在自然界中的视觉机制,尤其是那些在夜间活动的动物,如响尾蛇等,张阵的研究团队开发出一种新的图像融合和增强算法。这种算法结

合了红外图像的温度信息和微光图像的形态细节，通过模拟生物的视觉处理过程，增强图像的总体视觉效果，使得在夜间或光线昏暗的环境中，观察者能更加准确地识别和分析场景和目标。

随着神经网络技术 [28–38] 和机器学习技术 [39–43] 的飞速发展，生成对抗网络（Generative Adversarial Networks, GANs）已经在多个领域显示出其强大的应用潜力，尤其是在图像处理领域 [13]。这种网络不仅能够生成高质量的图像，还能用于图像的着色和去模糊化，显著提升图像的视觉质量和实用价值。在夜视图像处理中，有效地解决夜间图像因光照不足和环境因素导致的质量下降问题 [14]。

2 中心-周边分离网络 (CSSN) 模型

神经细胞之间的侧抑制现象最初是在某些动物的侧眼上发现的，一些灵长类生物侧眼由大约 1000 个小眼组成，每个小眼既抑制其邻近小眼，也为其邻近小眼所抑制。假设有个相互抑制的小眼，其数学模型为 n 个相互抑制的小眼，其数学模型为

$$V_i = V_i' - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n k_{ij}(V_j - V_{ij}^0) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 V_i 为第 i 个小眼受到相互抑制作用时的脉冲电压， V_i' 为第 i 个小眼单独受光照时的脉冲电压， $k_{i,j}$ 为第 j 个小眼对第 i 个小眼的抑制系数， V_{ij}^0 为第 j 个小眼对第 i 个小眼的抑制时必须达到的电压阈值 [15]。

图像处理中心-周边突触网络 (center-surround shunting network, CSSN) 中用了侧抑制现象，其动力学方程为

$$\frac{dV_i}{dt} = -AV_i + (B - V_i)(D + V_i) \sum_{k \neq i} I_k \quad (2)$$

式中 V_i 为网络中第 i 个细胞的电压， I_i 为输入到第 i 个细胞的兴奋贡献， $\sum_{k \neq i} I_k$ 为其它细胞对第 i 个细胞的抑制贡献， A 为向静止电压钝化的速率。常数 B 和 D 分别表示兴奋饱和值与抑制饱和值， C_1, C_2 为二维高斯核和模拟同心圆模式分布，总输出 I 为 $I = \sum_k I_k$ ，由于 $A \ll I$ ，在兴奋输入 I_i 作用下， V_i 趋向于 B ，在抑制输入 $\sum_{k \neq i} I_k$ 作用下， V_i 趋向于 $-D$ 。所以，用微分方程描述网络的动态过程，产生抑制反应的阈值为 0，并限定了兴奋和抑制反应的饱和点。用 DOG 描述同心圆拮抗模式的感受野：

$$DOG = C_1 - C_2 = c_1 e^{-\frac{(p^2+q^2)}{a_1^2}} - c_2 e^{-\frac{(p^2+q^2)}{a_2^2}} \quad (3)$$

C_1, C_2 是高斯核， p, q 是高斯核大小。应用到图像中，其动力学方程为

$$\frac{dE_{i,j}}{dt} = -AE_{i,j} + (B - E_{i,j})[C * I^c]_{i,j} - (D + E_{i,j})[C_2 * I^s]_{i,j} \quad (4)$$

与式相比， E 代替 V_i 作为处理后的信号，激励输出的输入是 I^c ，而抑制输出的输入量是 I^s 。 i, j 表示图像对应像素点， $I^c = I_{i,j}^c$ 表示送入中心兴奋图像， $I^s = I_{i,j}^s$ 表示送入周边抑制图像。 $E = E_{i,j}$ 表示处理后的结果图像。常数 A 是向零值衰减的速率。 A 应大于 $\max(C_1 + C_2) \cdot I$ 一个数量级的值。但是如果 A 过大，则起不到压缩动态范围的作用。

假定所有参数都是非负，设初始时刻 $t = 0$ 时， $E_{i,j} = 0$ ，得总输入 $I^c + I^s$ 越大，输出 E 达到稳态值 $E_{0,i,j}$ 的速度越快。 E 的大小取决于 $B \cdot [C_1 * I^c]_{i,j} - D \cdot [C_2 * I^s]_{i,j}$ ，即如果中心兴奋输入 I^c 与周边抑制输入 I^s 间的反差大，则 E 取得较大的值。在停止输入时，可得 $\frac{dE_{i,j}}{dt} = -AE_{i,j}$ 求解得 $E_i = e^{-At}$ ，可以得出：输入停止时， E 以速率 A 衰减，直至为 0。一般情况下， $A \ll I^c + I^s$ ，所以只有兴奋输入 I^c 时， E 趋于 B ，只有抑制输入 I^s 时， E 趋于 $-D$ 。

3 基于目标检测的 CSSN 融合结构

本文提出了基于 CSSN 平衡方程式的可见光与红外图像彩色融合结构, 包含增强、组合和图像显示等 3 个步骤, 图中的同心圆代表同心圆式中心周边分离网络对抗系统。其中第一阶段为也为增强级, 第二阶段微光抑制红外的处理组合阶段。首先采用拮抗特性模型中的中心-周边对抗网络对源红外与可见光图像进行增强, 利用区域生长方法对增强后红外图像进行分割, 根据分割后各区域亮度判断每一个区域是否属于准目标区域。在融合阶段加入两种融合运算: 采用一种选择性融合运算将准目标信息融合到可见光背景中作为亮度通道的输入; 另一种是将拮抗特性模型应用到图像融合中, 产生对比度图像作为饱和度通道的输入。直接将增强的可见光图像送入调色通道, 作为彩色融合图像的背景进行调色, 最后通过彩色重映射并加以显示。

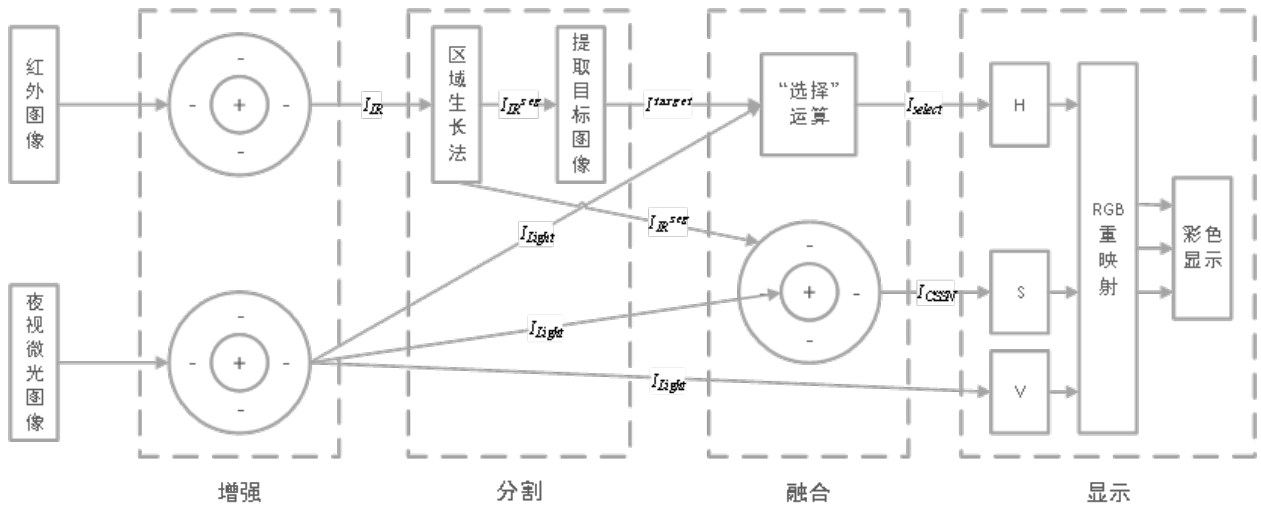


图 1. CSSN 融合方法结构图

具体算法步骤如下: I_{IR}^{seg}

第一、拮抗特性模型的处理—图像增强。

采用拮抗特性模型分别对夜视微光图像与红外图像进行增强处理, 具体是: 以差分高斯函数模拟人眼视网膜中的同心圆拮抗特性, 用于图像处理的中心-周边分离网络对抗系统, 其动力学方程为

$$\frac{dE_{i,j}}{dt} = -AE_{i,j} + (B - E_{i,j})[C_1 * I^c]_{i,j} - (D + E_{i,j})[C_2 * I^s]_{i,j} \quad (5)$$

其中 E 是处理后的图像, C_1 为二维高斯核、 C_2 为模拟同心圆模式分布, A 为向零值衰减的速率, B 为兴奋饱和值, D 为抑制饱和值, I^c 为中心兴奋图像, I^s 为周边抑制图像, i, j 为对应像素点的横坐标和纵坐标;

设 $B = D = 1$, 图像增强时保证 E 值动态范围为-1~1, 图像处理的中心-周边分离网络对抗系统达到平衡时的方程, 即 $\frac{dE_{i,j}}{dt} = 0$, 得到:

$$E_{i,j} = \frac{[C_1 * I^c]_{i,j} - [C_2 * I^s]_{i,j}}{A + [C_1 * I^c]_{i,j} + [C_2 * I^s]_{i,j}} \quad (6)$$

分别用参数 C 、高斯环代替 G_1 、 C_2 , 改写为

$$E_{i,j} = \frac{[C * I^c]_{i,j} - [G_s * I^s]_{i,j}}{A + [C * I^c]_{i,j} + [G_s * I^s]_{i,j}} \quad (7)$$

即用常数 A 、参数 C 和高斯环的大小定义了一种非线性的图像处理方法, 增强处理后的夜视微光图像记为 I_{Light} , 增强处理后的红外图像记为 I_{IR} ;

第二、目标分割级

采用区域生长法对增强处理后红外图像 I_{IR} 进行目标分割，具体是：选择具有最大灰度值的像素点作为种子点，在空间上采用八邻域连通方案对邻接的相似像素进行搜索；选择邻近的像素为：

$$I = \{ |Z - Z_{seed}| \leq T \}$$

其中 Z 表示像素的灰度值， Z_{seed} 表示种子点的灰度值， T 表示控制像素之间的相似度门限，对图像数据进行聚类分析，自动选取生长准则确定门限阈值 T ；

然后将种子像素周围邻域中与种子像素有相同或相近性质的像素合并到种子像素所在的区域中；应用形态学处理法对图像进行开闭运算处理，消除空洞和毛刺；根据标定的目标灰度值在分割后的红外图像 I_{IR}^{seg} 中提取目标图像 I_{target} ；

第三、融合级

图像融合，是通过一个数学模型把来自不同传感器的多幅图像综合成一幅满足特定应用需求的图像的过程，从而可以有效地把不同图像传感器的优点结合起来，提高对图像信息分析和提取的能力。为了彩色映射时显示出各通道特有颜色信息，在融合阶段加入了两种不同的融合运算。

1. “选择”运算：融合的过程为选择分割后的红外图像 I_{IR}^{seg} 的目标图像 I_{target} 作为融合后的图像目标部分，其余部分为增强后的夜视微光图像 I_{Light} ，合并得到“选择”运算的融合图像 I_{select} ，即

$$I_{select,i,j} = \begin{cases} I_{target,i,j} & \text{if } (i,j) \in I_{target} \\ I_{Light,i,j} & \text{else} \end{cases}$$

2. 拮抗融合运算：当输入不同图像（如红外和微光图像）即 $I^c \neq I^s$ ，可以产生红外抑制微光或微光抑制红外的拮抗融合图像。在融合过程中恰当选取常数 A 将使得输出的不均匀现象得到改善。取 $I^s = I_{IR}^{seg}$ 和 $I^c = I_{Light}$ ，根据步骤 (1) 中公式产生拮抗融合图像 I_{CSSV} ；在融合过程中选取常数 A 的范围为与 $\max[C_1 \times I^c + C_2 \times I^s]$ 在同一数量级的常数；

第四、显示级

融合后的图像利用三通道信息转换进行显示，具体是：采用视觉颜色 HSV 模型，该模型根据人眼的颜色知觉三个要素，即色调 (H)、饱和度 (S)、调色 (V) 来表示各个通道颜色属性，将对比度图像 I_{CSSV} 送入 S 通道，经过增强处理的夜视微光图像 I_{Light} 送入 V 通道；然后将 HSV 模型转化为 RGB 模型，并加以显示；从 HSV 彩色空间到 RGB 空间的三基色的转换公式为：

$$h_i = \left[\frac{H}{60} \right] \bmod 6, \quad f = \frac{H}{60} - h_i$$

$$p = V \times (1 - S), \quad q = V \times (1 - f \times S), \quad t = V \times (1 - (1 - f) \times S)$$

$$(R, G, B) = \begin{cases} (V, t, p), & \text{if } h_i = 0 \\ (q, V, p), & \text{if } h_i = 1 \\ (p, V, t), & \text{if } h_i = 2 \\ (p, q, V), & \text{if } h_i = 3 \\ (t, p, V), & \text{if } h_i = 4 \\ (V, p, q), & \text{if } h_i = 5 \end{cases}$$

其中 H 为色调, V 为颜色的相对明暗度, S 为颜色的饱和度或纯度, h_i 为色调参考值, f 为色调相对值, p 为饱和度—颜色转换值、 q 为明暗度—颜色转换值、 t 为色调—颜色转换值。

4 实验结果与分析

在一幅图像中, 灰度值与邻近区域有差异的地方, 差异将得到增强, 增强的程度与灰度值和差异的大小有关, 还与高斯系数 a_1 和 a_2 、 c_1 和 c_2 有关。选择合适的参数, 均能有效提高增强反差、突出边缘的能力。系数 a_1 和 a_2 的取值应使得二维 DOG 数组的大小不超过 5×5 , 本文取 3×3 矩阵大小。本文中一些阈值系数的设定都是根据主观选取, A 的取值应与 $\max(C_1 + C_2) \times I$ 处于同一个数量级。

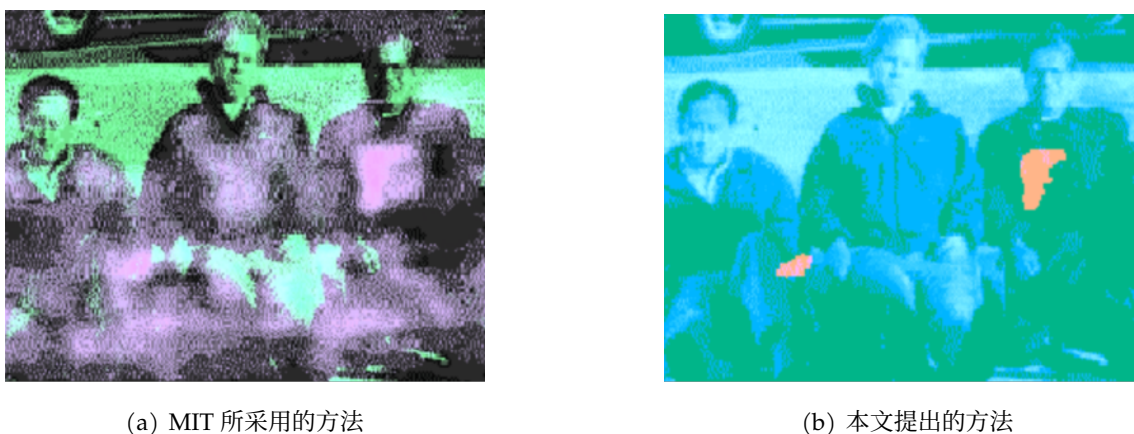


图 2. 融合结果

图 2 中 (a) 该结果是在学习 MIT 法基础上仿真的图像, 称为仿 MIT 法。(b) 是采用该文提出的方法得到的融合图 A 一般与图像灰度值处于同一数量级, 取 $A = 80$ 。 $Z_{seed} = 27, T = 10$ 通过彩色显示, 从视觉效果上看, 接近人眼视觉感的图像彩色映射方法, 最终得到既具有红外 (或毫米波) 图像较好的目标指示特性又具有可见光图像清晰场景信息的融合图像。

表 1. 评价指标比较

评价指标	熵			平均梯度		
	R	G	B	R	G	B
VIS 图	2.9504	-	-	0.0013	-	-
MMW 图	2.9504	-	-	0.0011	-	-
仿 MIT 法	0.9130	3.8709	0.9957	0.0012	0.00063	0.00040
改进的算法	2.4942	2.4583	2.9504	0.0004	0.00046	0.0012

由表可见, 本文算法 RGB 三通道的信息熵平均来说是最多, 所以包含的总信息量是最多的。图像的平均梯度越大, 表示图像的清晰度越好。本文的算法相比其它在 R 通道上的梯度比较小, 而在 B 通道上梯度最大, 而融合图像包含大部分背景和细节多在 B 通道上显示, 综合比较本文算法清晰度较好。

在图 2 (a) 中, 由于在毫米波有着红外光的性质, 身体的轮廓也能成像, 当目标区域被送入 R 通道时, 显示出了大范围的红色, 直接干涉人眼对危险物的定位。本文将增强的毫米波图像送入 R 通道, 使得目标物体显示成不同程度的暖色, 可见光图像的细节丰富, 直接将其送入 G 通道, 成蓝色背景为冷色。

5 结论

本文将生物视觉模型用于图像的增强和组合，增强反差、突出边缘均取得显著效果。在 MIT 法核心技术保密的情况下，分析了 MIT 结构，总结了 MIT 结构中体现出来的规则；将区域块的思想贯通全章节，提出基于目标检测的 CSSN 网络结构。实验证明拮抗网络能加强图像灰度值有变化区域的对比度，基于区域的 CSSN 融合结构增强了目标提取和判别分类的能力，最终使融合结果保留并增强源图像的突出信息。该算法实时、有效，适用于可见光与红外图像的融合。

创新说明

可见光图像提供了丰富的色彩信息，但在特定条件下（如夜间或恶劣天气）其表现受限；而红外图像则具有独特的热信息，但缺乏可见光图像中的色彩信息。因此，将两种图像进行融合可以提高目标检测和识别的效果，但目前的融合技术仍存在着信息丢失、融合不自然等问题。

目前的可见光与红外图像融合技术存在着信息丢失和融合不自然的问题。传统的方法通常是简单地将两种图像进行叠加或加权平均，这样做容易导致目标信息不清晰或融合效果不自然，影响了后续目标检测和识别的准确性。

本文提出了基于 CSSN 平衡方程式的可见光与红外图像彩色融合结构。该方法包含增强、组合和图像显示三个步骤，将增强的可见光图像作为彩色融合图像的背景进行调色，并通过彩色重映射技术进行显示。

本文的创新点和意义在于：首先，采用了拮抗特性模型中的中心-周边对抗网络进行增强，有效保留了可见光和红外图像的关键信息；其次，引入了选择性融合和对比度图像生成的方法，提高了融合图像的自然度和目标指示特性；最后，通过彩色重映射技术，使融合图像更适合人眼观察，有利于提高对目标情景的感知能力。这一创新技术有望在军事、安防、医疗等领域发挥重要作用，提高目标检测和识别的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 蒋晓瑜, 裴闯, 汪熙, 谢之宇. (2010). 一种面向目标的伪彩色图像融合算法. 装甲兵工程学院学报, 24(6), 55-58.
- [2] 张纪乾. (2024). 热红外与可见光图像融合方法研究 [D]. 西安理工大学.
- [3] 沈英, 黄春红, 黄峰, 等. (2021). 红外与可见光图像融合技术的研究进展 [J]. 红外与激光工程, 50(09), 152-169.
- [4] 高文, 朱明, 郝志成. (2016). 彩色夜视技术的研究进展 [J]. 液晶与显示, 31(12), 1168-1179.
- [5] Zhou, H. (2012). An stationary wavelet transform and curvelet transform based infrared and visible images fusion algorithm. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6(1), 144-151.
- [6] Liu, Y., Qi, Z., Cheng, J., & Chen, X. (2024). Rethinking the Effectiveness of Objective Evaluation Metrics in Multi-focus Image Fusion: A Statistic-based Approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. doi: 10.1109/TPAMI.2024.3367905.
- [7] He, W., Guo, Y., & Gao, C. (2011). An adaptive color fusion method for infrared and visible images. *ICIC Express Letters*, 5(7), 2359-2364.
- [8] 李立柱, 孟明, 高云园, 等. (2023). 基于小波变换的 EEG-fNIRS 多模态数据融合方法 [J]. 传感技术学报, 36(07), 1064-1072.
- [9] Shao, Z., Liu, J., & Cheng, Q. (2012). Fusion of infrared and visible images based on focus measure operators in the curvelet domain. *Applied Optics*, 51(12), 1910-1921.
- [10] Adu, J., Wang, M., Wu, Z., & Hu, J. (2012). Infrared image and visible light image fusion based on nonsubsampling contourlet transform and the gradient of uniformity. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 4(5), 114-121.

- [11] 朱进. (2021). 微光/热红外图像色彩传递及多尺度分解融合算法研究 [D]. 北京理工大学.
- [12] 张阵. (2019). 红外与微光图像彩色融合仿生算法的研究与实现 [D]. 武汉理工大学.
- [13] 周丁. (2023). 红外图像与可见光图像的融合研究 [D]. 江苏科技大学.
- [14] 林怡彤. (2024). 基于图像增强与对抗网络的夜视图像彩色化 [D]. 湖南大学.
- [15] van Kerkoerle, T., Self, M., & Roelfsema, P. (2017). Layer-specificity in the effects of attention and working memory on activity in primary visual cortex. *Nat Commun*, 8, 13804.
- [16] Fang, F. A. N. G., Tan, W., & Liu, J. Z. (2005). Tuning of coordinated controllers for boiler-turbine units. *Acta Automatica Sinica*, 31(2), 291-296.
- [17] Wei, L., & Fang, F. (2016). H_∞ -LQR-Based Coordinated Control for Large Coal-Fired Boiler-Turbine Generation Units. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 5212-5221.
- [18] Wang, W., Liu, J., Zeng, D., Fang, F., & Niu, Y. (2020). Modeling and flexible load control of combined heat and power units. *Applied Thermal Engineering*, 166, 114624.
- [19] Liu, J., Song, D., Li, Q., Yang, J., Hu, Y., Fang, F., & Joo, Y. H. (2023). Life cycle cost modelling and economic analysis of wind power: A state of art review. *Energy Conversion and Management*, 277, 116628.
- [20] Fang, F., Zhu, Z., Jin, S., & Hu, S. (2020). Two-layer game theoretic microgrid capacity optimization considering uncertainty of renewable energy. *IEEE Systems Journal*, 15(3), 4260-4271.
- [21] Liu, J., Zeng, D., Tian, L., Gao, M., Wang, W., Niu, Y., & Fang, F. (2015). Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems. *Proceedings of the CSEE*, 35(21), 5385-5394.
- [22] Fang, F., & Xiong, Y. (2014). Event-driven-based water level control for nuclear steam generators. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 61(10), 5480-5489.
- [23] Lv, Y., Lv, X., Fang, F., Yang, T., & Romero, C. E. (2020). Adaptive selective catalytic reduction model development using typical operating data in coal-fired power plants. *Energy*, 192, 116589.
- [24] Fang, F., & Wu, X. (2020). A win-win mode: The complementary and coexistence of 5G networks and edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 3983-4003.
- [25] Lv, Y., Fang, F. A. N. G., Yang, T., & Romero, C. E. (2020). An early fault detection method for induced draft fans based on MSET with informative memory matrix selection. *ISA transactions*, 102, 325-334.
- [26] Wang, N., Fang, F., & Feng, M. (2014, May). Multi-objective optimal analysis of comfort and energy management for intelligent buildings. In *The 26th Chinese control and decision conference (2014 CCDC)* (pp. 2783-2788). IEEE.
- [27] Fang, F., Jizhen, L., & Wen, T. (2004). Nonlinear internal model control for the boiler-turbine coordinate systems of power unit. *PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING*, 24(4), 195-199.
- [28] Li, W., Wang, Y., Li, H., & Li, X. (2019, January). P3M: a PIM-based neural network model protection scheme for deep learning accelerator. In *Proceedings of the 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference* (pp. 633-638).
- [29] Wang, Y., Deng, J., Fang, Y., Li, H., & Li, X. (2017). Resilience-aware frequency tuning for neural-network-based approximate computing chips. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 25(10), 2736-2748.
- [30] Qu, S., Li, B., Wang, Y., Xu, D., Zhao, X., & Zhang, L. (2020, July). RaQu: An automatic high-utilization CNN quantization and mapping framework for general-purpose RRAM accelerator. In *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [31] Li, C., Wang, Y., Liu, C., Liang, S., Li, H., & Li, X. (2021). GLIST: Towards in-storage graph learning. In *2021 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 21)* (pp. 225-238).

- [32] Liu, B., Chen, X., Wang, Y., Han, Y., Li, J., Xu, H., & Li, X. (2019, January). Addressing the issue of processing element under-utilization in general-purpose systolic deep learning accelerators. In Proceedings of the 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference (pp. 733-738).
- [33] Wang, C., Wang, Y., Han, Y., Song, L., Quan, Z., Li, J., & Li, X. (2017, January). CNN-based object detection solutions for embedded heterogeneous multicore SoCs. In 2017 22nd Asia and South Pacific design automation conference (ASP-DAC) (pp. 105-110). IEEE.
- [34] Xu, D., Chu, C., Wang, Q., Liu, C., Wang, Y., Zhang, L., ... & Cheng, K. T. (2020, October). A hybrid computing architecture for fault-tolerant deep learning accelerators. In 2020 IEEE 38th International Conference on Computer Design (ICCD) (pp. 478-485). IEEE.
- [35] Liu, C., Chu, C., Xu, D., Wang, Y., Wang, Q., Li, H., ... & Cheng, K. T. (2021). HyCA: A hybrid computing architecture for fault-tolerant deep learning. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 41(10), 3400-3413.
- [36] Chen, W., Wang, Y., Yang, S., Liu, C., & Zhang, L. (2020, March). You only search once: A fast automation framework for single-stage dnn/accelerator co-design. In 2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) (pp. 1283-1286). IEEE.
- [37] Wang, Y., Li, H., & Li, X. (2017). A case of on-chip memory subsystem design for low-power CNN accelerators. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 37(10), 1971-1984.
- [38] Liu, Q., Cheng, L., Ozcebe, T., Murphy, J., & Lukkien, J. (2019, May). Deep reinforcement learning for IoT network dynamic clustering in edge computing. In 2019 19th IEEE/ACM international symposium on cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID) (pp. 600-603). IEEE.
- [39] Hamdioui, S., Pouyan, P., Li, H., Wang, Y., Raychowdhur, A., & Yoon, I. (2017, November). Test and reliability of emerging non-volatile memories. In 2017 IEEE 26th Asian Test Symposium (ATS) (pp. 175-183). IEEE.
- [40] Ma, X., Wang, Y., Wang, Y., Cai, X., & Han, Y. (2022). Survey on chiplets: interface, interconnect and integration methodology. CCF Transactions on High Performance Computing, 4(1), 43-52.
- [41] Wu, B., Wang, C., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, D., Liu, D., ... & Hu, X. S. (2020). Field-free 3T2SOT MRAM for non-volatile cache memories. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 67(12), 4660-4669.
- [42] Zhao, X., Wang, Y., Liu, C., Shi, C., Tu, K., & Zhang, L. (2020, July). BitPruner: Network pruning for bit-serial accelerators. In 2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC) (pp. 1-6). IEEE.
- [43] Han, Y., Wang, Y., Li, H., & Li, X. (2014, November). Data-aware DRAM refresh to squeeze the margin of retention time in hybrid memory cube. In 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD) (pp. 295-300). IEEE.



曹欣然 北京市人, 厦门大学航空航天学院 2023 级学生, 研究方向: 人工智能、电子信息

Cao Xinran is studying at the School of Aeronautics and Astronautics of Xiamen University, and his research interests include artificial intelligence and electronic information.



马慧蓿 2010 年毕业于长春光机学院原子与分子物理专业, 获硕士学位, 目前为北京工商大学系统科学专业在职博士生。研究方向为复杂系统建模、模式识别与信息融合、机器学习等。

Ma Huijun graduated from Changchun Institute of Optics and Mechanics with a master's degree in atomic and molecular physics in 2010. She is currently an on-the-job doctoral student in systems science at Beijing Technology and Business University. Research directions include complex system modeling, pattern recognition and information fusion, machine learning, etc.