

基于自适应加权的多尺度图像融合研究

胡雪凯¹, 罗蓬¹, 李铁成¹, 蔡玉汝^{2,3}, 马娜⁴, 周雪青¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 210061;

3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 4. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘要:近年来图像融合技术广泛应用到电力行业,通过不同类型的图像传感器采集电力设备和输电线的图像,经过红外和可见光的图像融合处理,实现电力设备及输电线的智能巡视和故障分析。文中提出一种基于自适应加权的多尺度图像融合算法,采用配准后的可见光和红外图像,进行多尺度小波分解,根据高低频的不同图像特征,低频采用自适应加权融合规则,高频采用绝对值最大的融合规则,将融合后的小波系数进行逆变换后得到全新的融合图像。通过对融合图像的主观和客观评价分析,证明融合算法解决了单一图像传感器采集图像存在的完整性问题,提高了融合图像细节信息,提升了场景的置信度。

关键词: 红外与可见光; 图像融合; 电力设备; 多源传感器

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)04-0404-06

Multi-scale Image Fusion Based on Adaptive Weighting

HU Xuekai¹, LUO Peng¹, LI Tiecheng¹, CAI Yuru^{2,3}, MA Na⁴, ZHOU Xueqing¹

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China;

3. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

4. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: In recent years, image fusion technology has been widely used in the power industry. Different types of image sensors are used to collect images of power equipment and transmission lines. Through the fusion of infrared and visible light images, intelligent inspection and fault analysis of power equipment and transmission lines can be realized. This article first briefly introduces common image fusion algorithms and fusion image evaluation standards. A multi-scale image fusion algorithm based on adaptive weighting is proposed, which uses the registered visible light and infrared images to perform multi-scale wavelet decomposition. According to the different image characteristics of high and low frequencies, the low frequency adopts the adaptive weighted fusion rule and the high frequency adopts the fusion rule with the largest absolute value. The fused wavelet coefficients are inversely transformed to obtain a new fused image. Subjective and objective evaluation and analysis of the fusion image confirm that the fusion algorithm solves the integrity problem of the image collected by a single image sensor, enhances the detailed information of the fusion image, and improves the confidence of the scene.

Key words: infrared and visible light, image fusion, electric equipment, multi-sensor

0 引言

国家电网在2018年2月首次提出“泛在电力物

联网建设智慧企业”的信息通信战略目标,在2019年1月公布的1号文件中年度重点工作首位便是“打造状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活的泛在

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-11-17.

作者简介: 胡雪凯(1987-),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统计算分析、新能源并网检测分析等方面的研究。

通信作者: 马娜(1985-),女,硕士,助理研究员,主要从事物联网在智能电网,智能工业等方面的研究。E-mail: man@sari.ac.cn.

基金项目: 国家电网项目《基于云边计算协同的异构传感器网络开放式接入网关与组网技术研究》。

电力物联网”。电力设备长时间在高压、高负荷、高温的工作环境下运行,以及冰雪、台风、雷电、地震等恶劣自然环境的影响。利用多源异构传感数据组成电力系统的状态感知和故障诊断系统^[1],如环境、微气象数据、局放、红外、电量等监测数据,可见光、红外、紫外等机器视觉数据、温度、湿度、气象、地理等环境数据,以及台账数据、巡检数据等设备历史数据组成。

1 红外与可见光图像融合方法

1.1 电力设备的常用图像融合方法

机器视觉中的图像处理技术在智能化运维、实时态势感知、电力系统最优运行调度等电力物联网高级应用场景中得到了广泛的应用,通过不同类型的机器视觉图像传感器组合搭配,如可见光与红外图像融合、可见光与紫外光图像融合、可见光与毫米波图像融合、CT与MRI的图像融合、SAR与红外的图像融合,对采集的图像进行配准、分割、特征提取、目标识别等图像处理和计算机处理,形成高质量的融合图像^[2-3],实现全天候的智能巡视。例如,将机器视觉引入到输电线的定期巡检作业中,通过视频及图像分析提取输电线路图像,提供智能巡检服务,山东电科院早在2012年开展无人机实现高海拔区域的输电线巡线^[4];将机器视觉与机器人相结合,开发变电站内自动巡检车;将机器视觉引入到高压断路器的机械特性判断,进行开关合闸位置判断^[5],机器视觉技术也可进行电力工程的入场安装前结构参数检测。

当电力设备发生接线接触不良、接线错误、端子松动、开关切换不灵等故障,通常伴有电流和电压的突变,造成局部或整体的异常发热,据统计^[6]热故障在电力设备总故障的占比为80%。红外成像利用红外传感器对发热物体的敏感特性成像,优点是对外界环境的影响不大,缺点是图像中物体边缘细节信息较少,对比度和清晰度较差;可见光成像是场景信息的真实反映,优点是具有较高的纹理和边缘细节,缺点天气和自然光等环境因素对清晰度有直接影响。可以很好地防止由于恶劣的环境或者突发事件造成大规模停电。因此文中利用可见光、红外热图像的互补性,通过图像融合处理,避免单一图像传感器的缺点,同时获得可见光的边缘与细节信息与红外的热辐射目标信息,提升对场景的感知和理解,并可全天候适用。

像素级融合是在图像原始像素的基础上通过一定的策略并计算新的像素值,融合后图像含较多的原始图像信息,有利于进一步的分析处理。像素级融合包括空间域融合方法和变换域融合方法,空间域的算

法主要有加权平均、基于PCA、基于HIS色彩映射等融合方法,其中加权平均算法根据权重因子对图像视觉效果进行调整,较多低频融合采用该方法;图1(a)为高空输电线路的红外图像,图1(b)为高空输电线路的可见光图像,图1(c)是加权平均融合图像。融合图像相较于可见光图像总体的亮度和对比度有所下降,地面的树木清晰度下降。



(a) 红外图像 (b) 可见光图像 (c) 加权平均融合图像
(a) Infrared image (b) Visible image (c) Weighted average fused image

图1 加权融合算法

Fig.1 Weighted fusion algorithm

变换域的融合算法主要有拉普拉斯金字塔、离散余弦变换、小波变换和多尺度分解法等融合方法。拉普拉斯金字塔分解^[7]在融合过程中,有较多的冗余信息容易产生“阻塞”。离散余弦变换主要用于多聚焦图像,图2(a)和图2(b)是一张前面时钟清晰、一张后面时钟清晰的两组不同聚焦时钟图,图2(c)是基于余弦算法的融合图像,可以看出两个时钟的清晰度均提高了;小波变换除了具有塔型变换的特点,还具有较好方向性的视觉效果。



(a) 图像1 (b) 图像2 (c) 融合后图像
(a) Image 1 (b) Image 2 (c) Fused image

图2 基于余弦变换的图像融合处理

Fig.2 Image fusion processing based on cosine transform

由于对热故障检测时,图像中的色彩信息对图像融合检测的影响较小,因此文中后续处理采用灰度图像。

1.2 基于小波变换的红外与可见光融合方法

基于小波变换(wavelet transform,简称WT)的多尺度变换,具有方向选择性、正交性、可变的时频分辨率等特性,更加符合人眼对不同方向的高频分量具有不同分辨率的视觉机制,可以获得更好视觉效果的融合图像。首先按照公式(1)进行Mallat离散小波对图像分解,其中 D_j^H 、 D_j^V 、 D_j^D 是图像在 C_{j-1} 尺度层

上的近似分量、水平和垂直细节分量; $j-1$ 为多尺度分解层数; r 、 c 分别是图像的行和列; H 、 G 分别是低通、高通滤波器; C_j 是第 j 层分解的低频分量, 是 C_{j-1} 上的近似。

$$\begin{aligned} C_j &= H_c H_r C_{j-1} \\ D_j^H &= G_c H_r C_{j-1} \\ D_j^V &= H_c G_r C_{j-1} \\ D_j^D &= G_c G_r C_{j-1} \end{aligned} \quad (1)$$

将原图像分解为一系列不同空间分辨率下不同频带的子图, 根据图像子频带分别进行小波系数的融合处理, 组成全新的融合图像的小波系数, 对各分阶层从高到低分别根据融合方案和算子进行融合处理, 形成融合图像的小波系数, 令 H 、 G 的共轭矩阵为 H^* 、 G^* , 按照公式(2)完成小波逆变换, 恢复得到全新的融合图像。

$$C_{j-1} = H_r^* H_c^* C_j + H_r^* G_c^* D_j^H + G_r^* G_c^* D_j^D \quad (2)$$

式中: \tilde{h} , \tilde{g} 分别是低通、高通综合滤波器。

图 3(a)和图 3(b)分别是高空输电线的红外光图像和可见光图像, 图 3(c)是基于小波变换的融合图像, 可以看出融合图像兼具红外的对比度和可见光的细节, 同时相较于图 1(c)的加权平均算法具有更好的对比度, 适合人眼观察。



(a) 红外图像 (b) 可见光图像 (c) 小波变换图像融合
(a) Infrared image (b) Visible image (c) WT image fusion

图 3 基于小波变换的图像融合处理

Fig.3 Wavelet transform image fusion

2 基于自适应加权的多尺度融合

2.1 自适应加权小波图像融合

目前基于小波变换的图像融合方法的研究主要集中在: 融合规则及融合算子的选择, 小波分解与重构的形式。文献[8]设计了一种基于边缘选择的低频融合规则, 高频采用绝对值最大的融合规则, 更好地保留图像的边缘信息。文献[9]将离散小波应用于遥感图像的融合中, 进行小波变换时, 采用行列降采样。提出一种基于自适应的多尺度的图像融合算法, 首先对图像进行多尺度小波变换分解, 低频子带与源图像近似, 考虑到图像拍摄可能有暗背景的情况, 根据图像能量的大小采用自适应调节加权系数进行融合, 高频子带包含图像纹理、边缘等细节信息, 选取绝对值最大的那个小波系数, 最后将融合后的小波系数进行小波逆变换, 生成融合图像, 具体处理过程如图 4 所示。

步骤一: 按照公式(1)进行 Mallat 离散小波图像分解;

步骤二: 低频子带与源图像近似, 考虑到图像拍摄可能有暗背景的情况, 根据图像能量的大小采用自适应调节加权系数进行融合, 高频子带包含图像纹理、边缘等细节信息, 选取绝对值最大的那个小波系数, 具体融合规则在下面将详细介绍;

步骤三: 按照公式(2)进行小波逆变换生成融合图像。

2.2 融合算法方案

融合规则的设计是获得高品质融合图像的重中之重^[10], 常用的图像融合规则有平均法、绝对值取大以及 L1 范数等^[11], 文中设计一种根据图像的低频和不同特性, 采用不同的融合规则。

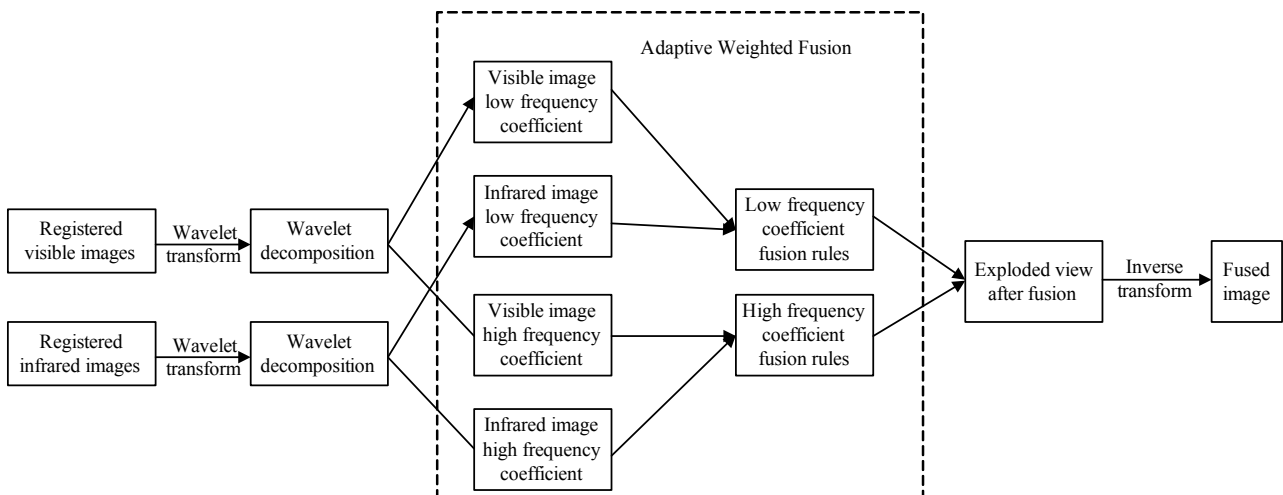


图 4 基于自适应多尺度小波变换的图像融合流程

Fig.4 Image fusion process based on adaptive multi-scale wavelet transform

1) 低频融合规则

低频采用自适应的加权融合规则,将图像划分为 $M \times N$ 块,根据区域方差和能量大小自适应加权调节因子调节后融合,实现区域自动调节融合,达到方差大的区域尽量保留到融合区域中,方差小的区域较小比例保留到融合图像中,避免过多保留一幅图片的信息,区域方差 σ 和能量 E 的计算公式为式(3),其中 u 为局部区域的方差均值。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x,y) - u] \\ E = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y)^2 \end{cases} \quad (3)$$

自适应加权融合后的低频子带系数计算如公式(4),式中 ω_A 和 ω_B 分别表示红外图像和可见光图像 B 的权值, $C_J(F,p)$, $C_J(A,p)$, $C_J(B,p)$ 是像素点 p 对应融合图像、红外图像 A 和可见光图像 B 在 J 层分解时的小波系数。当图像 A 的区域能量大的时候,图像 A 的融合比例较大,反之,当图像 B 的区域能量大的时候,图像 B 的融合比例较大。

$$C_J(F,p) = \omega_A C_J(A,p) + \omega_B C_J(B,p) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \omega_A = \exp[-E_A / 2(\sigma_A)^2], \omega_B = 1 - \omega_A, E_A > E_B \\ \omega_B = \exp[-E_B / 2(\sigma_B)^2], \omega_A = 1 - \omega_B, E_B > E_A \end{cases} \quad (5)$$

2) 高频融合规则

高频采用绝对值最大的融合规则,融合后高频子带系数计算如公式(6),式中 $V_{A,j}(x,y)$, $V_{B,j}(x,y)$ 是图像 A 和 B 高频分量,取两幅图像中绝对值最大的那个系数作为融合图像的高频系数。

$$\begin{cases} F_j^i(x,y) = \omega \times V_{A,j}^i(x,y) + (1 - \omega) \times V_{B,j}^i(x,y) \\ \omega = \begin{cases} 1, |V_{A,j}^i(x,y)| > |V_{B,j}^i(x,y)| \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

3 图像融合算法仿真

3.1 图像融合主观评价

图像融合源图像分别采用已经经过配准的高空输电线路和某变电站内电力设备两种场景可见光图像和红外光图像,采用 Matlab 软件进行算法实现。针对高空输电线路的红外光图像和可见光图像依次进行加权平均算法、小波变换,小波变换系数平均加权算法,小波系数低频采用自适应加权和高频采用最大值的融合算法(即本文的改进算法)图像融合后,图 5(a)为高空输电线路的红外光图像,图 5(b)为高空输电线路的可见光图像,图 5(c)为采用加权平均算法的融合图像,图片整体偏暗,对比度相对其他方法较差,图 5(d)采用小波变换的融合图像,图 5(e)采用小波变换

后系数平均加权算法的融合图像,融合后的图像清晰度和对比度要好于图 5(c)和图 5(d),图 5(f)是采用小波变换自适应加权小波变换的融合图像(即自适应加权的多尺度图像融合),清晰度和对比度要好于图 6(c)和图 5(d),较图 5(e)具有更好的细节信息,更加适合人眼观察。

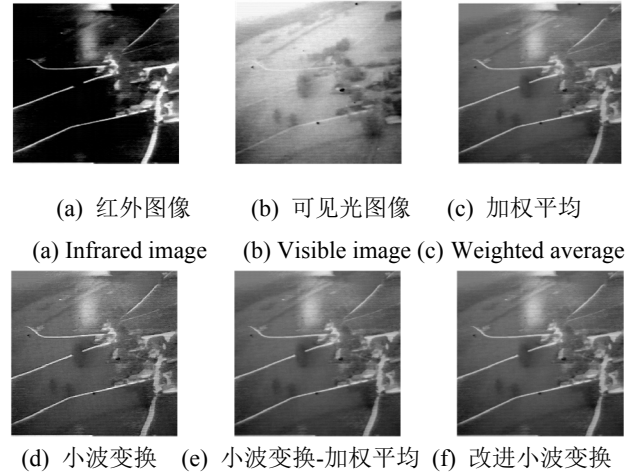


图5 不同融合算法的融合结果图

Fig.5 Fusion results of different fusion algorithms

图 6(a)为电力设备的红外光图像,图 6(b)为电力设备的可见光图像,图 6(c)为小波变换系数进行平均加权融合效果,图 6(d)为文中采用自适应加权的多尺度融合效果,通过图像的比对图中设备的边缘细节,图 6(d)的清晰度要好于图 6(c)的融合效果。

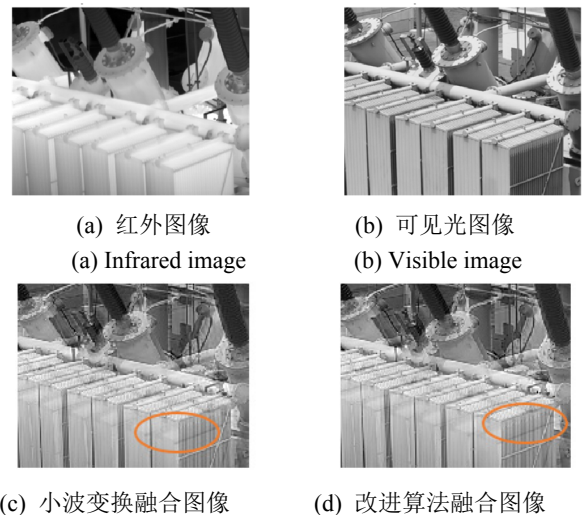


图6 小波变换及改进算法的图像融合

Fig.6 Image fusion of WT and improved algorithm

3.2 图像融合客观评价

图像融合的客观评价^[12]通过数学计算方式进行图像质量的评估的量化评价,可通过数值大小客观评

价,主要分为3类:标准差(standard deviation, STD)、均值(MEAN)、平均梯度(average gradient, AG)和信息熵(entropy, EN)等基于统计特征的评价方法,标准差主要反映图像像素值与灰度均值之间的离散程度,均值是图像平均亮度的一个反映指标,平均梯度是细节反差和纹理变化特征的一个反映指标。信息熵反映图像中包含平均信息量的多少;均方误差、均方根误差(root mean square error, RMSE)、信噪比等与理想参考图像对比的评价方法,均方根误差反映融合图像与源图像间的灰度差异;结构相似度(structural similarity, SSIM)、交叉熵(cross entropy, CEN)等与源图像联系程度的评价方法,结构相似度,用滑窗技术从结构、对比度和亮度的失真角度计算。交叉熵主要反映与源图像对应像素的灰度差异。

以一幅 $M \times N$ 的图像 G 为例,本文采用的几种客观评价指标计算公式如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \text{MEAN} &= \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G(i, j) \\ \text{STD} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (G(i, j) - \bar{G})^2}{M \times N}} \\ \text{AG} &= \frac{1}{(M-1)(N-1)} \\ &\quad \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(G(i+1, j) - G(i, j))^2 + (H(i, j+1) - H(i, j))^2}{2}} \\ \text{EN}(G) &= -\sum_{i=0}^{L-1} P(i) \log_2 P(i) \\ \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [G_F(i, j) - G_R(i, j)]^2}{M \times N}} \\ \text{SSIM}(R, F) &= |I(R, F)|^\alpha \times |s(R, F)|^\beta \times |z(R, F)|^\gamma \\ \text{CEN} &= \sum_{i=1}^L P_i \log_2 (p_i/q_o) \end{aligned} \tag{7}$$

表1 高空输电线图像的融合客观评价标准对比

Table 1 Comparison of objective evaluation criteria for fusion of high-altitude transmission line images

	STD	MEAN	AG	EN	RMSE	SSIM	CEN
Weighted average	39.3650	98.5524	3.1722	7.1353	71.4027	0.3234	1.0664
wavelet transform	39.3650	98.5523	3.1722	7.1353	71.4027	0.3234	1.0664
WT & weighted average	38.2143	109.7571	2.9482	7.1895	85.4409	0.2735	1.1609
Improved wavelet transform	41.2748	98.2816	5.2196	7.2012	70.9102	0.3392	4.0186

表2 电力设备图像融合客观评价指标对比

Table 2 Comparison of objective evaluation indicators for image fusion of power equipment

	STD	MEAN	AG	EN	RMSE	SSIM	CEN
Wavelet transform	51.1815	147.3664	6.1471	7.5610	40.2199	0.5510	0.3889
Improved wavelet transform	55.0531 ↑	147.1156	10.4049 ↑	7.6992 ↑	40.4952	0.4329 ↓	0.3403 ↓

式中: $P(i)$ 为灰度为 i 的像素数与总像素数的比; $G_F(i, j)$ 是参考图像; $G_R(i, j)$ 是融合图像; α, β, γ 是权重系数(通常取1); $I(R, F), s(R, F), z(R, F)$ 是图像 R 和 F 的亮度、对比度和结构相似性。

上述客观评价指标中,均值、标准差、平均梯度、信息熵的数值越大,融合后的图像包含的信息越多,细节和纹理丰富,融合效果越好。均方根误差、结构相似度、交叉熵的数值越小,与参考图像或者源图像的差异越小,融合后的图像效果越好。

对图5和图6的图像融合效果图的客观评价分别见表1和表2,通过表1客观评价标准的对比,可以看到均方差、熵值和平均梯度在几种融合算法那中表现最优,融合的效果有所改善。

通过表2的客观评价指标可以看出,文中采用自适应加权的多尺度融合的标准差、熵值和平均梯度均有所提升,代表图像信息量有所增加,包含的细节和纹理等特征信息变得更为丰富。结构相似度和交叉熵值有所减少,代表着和原图的差异性较小,融合效果较为理想。

4 结论

对电力应用场景下红外光和可见光的配准图像,进行基于小波的多尺度变换的图像融合,针对低频子带包含了亮度信息,高频子带因为包含了图像的纹理、边缘等细节信息的特征,提出了一种自适应的多尺度融合算法,低频子带根据方差和能量的大小进行自适应加权平均处理,高频子带采用最大值保留更多信息,从测试结果可以看出,该融合算法既保留可见光图像中的纹理细节、图像边缘轮廓信息,又保留了红外图像中发热物体等特征,可全天候工作,目测融

合图像具有较多细节信息和清晰度, 客观评价标准的几项指标也有所提高, 为后续智能巡视的检测与识别奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王景致, 刘刚, 袁嘉彬, 等. 电力巡检中的图像融合技术与应用[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(8): 4.
WANG Jingzhi, LIU Gang, YUAN Jiabin, et al. Image fusion technology and application in power inspection[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2019, 38(8): 4.
- [2] Pohl C, Van Genderen J L. Review article multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823-854.
- [3] 李婵飞, 刘文晶. 一种新颖的红外与可见光图像融合方法[J]. 红外技术, 2020, 42(4): 74-81.
LI Chanfei, LIU Wenjing. Novel fusion method for infrared and visible light images[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(4): 74-81.
- [4] 陈凤翔, 刘博迪, 方广东. 基于机器视觉的无人机电力巡线技术[J]. 电子技术与软件工程, 2019, 150(4): 76-77.
CHEN Fengxiang, LIU Bodi, FANG Guangdong. Research on the technology of UAU power line inspection based on machine vision[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019, 150(4): 76-77.
- [5] 王立军, 张拓, 刘光伟, 等. 基于机器视觉技术的高压断路器机械特性诊断[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 303-309.
WANG Lijun, ZHANG Tuo, LIU Guangwei, et al. Diagnostics on mechanical characteristics of high voltage circuit breaker based on machine vision technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 303-309.
- [6] Ardeshir A Goshtasby, Stavri Nikolov. Guest editorial: image fusion: advances in the state of the art[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 114-118.
- [7] 苗启广, 王宝树. 基于改进的拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1605-1610.
MIAO Qiguang, WANG Baoshu. Multi-sensor image fusion based on improved Laplacian pyramid transform[J]. *Acta Optics Sinica*, 2007, 27(9): 1605-1610.
- [8] 晁锐, 张科, 李言俊. 一种基于小波变换的图像融合算法[J]. 电子学报, 2004, 32(5): 750-753.
CHAO Rui, ZHANG Ke, LI Yanjun. An image fusion algorithm using wavelet transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(5): 750-753.
- [9] ZHANG Bin, ZHENG Yongguo, FANG Wei, et al. A new image fusion algorithm based on second generation wavelet transform [C]// *Computational Intelligence & Natural Computing Proceedings Second International Conference*, 2010, 1: 390-393.
- [10] 陶冰洁, 王敬儒, 许俊平. 基于小波分析的不同融合规则的图像融合研究[J]. 红外技术, 2006(7): 62-65.
TAO Bingjie, WANG Jingru, XU Junping. Study on image fusion based on different fusion rules of wavelet transform[J]. *Infrared Technology*, 2006(7): 62-65.
- [11] 张生伟, 李伟, 赵雪景. 一种基于稀疏表示的可见光与红外图像融合方法[J]. 电光与控制, 2017, 24(6): 47-52.
ZHANG Shengwei, LI Wei, ZHAO Xuejing. A method for fusion of visible and infrared images based on sparse representation[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(6): 47-52.
- [12] 杨艳春, 李娇, 王阳萍. 图像融合质量评价方法研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(7): 6-20.
YANG Yanchun, LI Jiao, WANG Yangping. Review of image fusion quality evaluation methods[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2018, 12(7): 6-20.