

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.024

压缩感知图像加权融合算法在热故障监测中的应用*

肖儿良, 黄元松
(上海理工大学 光电学院, 上海 200093)

摘要:针对电气设备热故障定位采用彩色图像融合方法时数据量大的问题,对彩色图像融合以及压缩感知理论进行了研究和归纳,提出了一种基于压缩感知的红外与可见光彩色图像加权融合算法。首先分别将红外热图像与可见光彩色图像分解为单独的 3 个 R、G、B 通道,运用小波基对分离出来的各通道数据进行了稀疏表示;其次利用高斯随机矩阵对稀疏数据进行采样得到了测量值,将对应通道的测量值通过两个权重因子进行了融合;最后通过正交匹配追踪重构算法(OMP)对各通道的融合数据进行了重构,将得到的 3 通道重构数据恢复为融合后的彩色图像。研究表明,该算法能用比传统彩色图像融合少 50% 的采样点来实现融合;在平均梯度、峰值信噪比、空间频率以及信息熵上与传统数据融合指标相当,较好地保留了红外热图中的温升区域信息和可见光背景信息。

关键词:图像融合;红外热图像;可见光图像;压缩感知;热故障

中图分类号:TP391;TM762

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0674-06

Application of weighted image fusion based on compressed sensing in thermal fault monitoring

XIAO Er-liang, HUANG Yuan-song

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai For Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problems of large data in color image fusion of the thermal fault location of electrical equipment, researches and inductions were made for the color image fusion and compressed sensing theory, a kind of infrared and visible color image fusion algorithm based on compressed sensing was proposed. Firstly, the infrared thermal image and visible color image data was decomposed into three channels of R, G, B, each channel of the data was represented by wavelet-basis. Secondly, Gauss random matrix was used to sample the sparse data and get the measured value, the measurement value of the corresponding channel was fused by the weighting factors. Finally, the orthogonal matching pursuit reconstruction algorithm (OMP) was performed to reconstruct the fusion data of each channel, the reconstruction data was restored to the color fused image. The results indicate that the proposed algorithm can achieve fusion with less than 50% of the sample points. The value of AG, PSNR, SF, IE is close to the index of traditional data fusion, which maintains the information of high temperature area and background area perfectly.

Key words: image fusion; thermal image; visible image; compressed sensing; thermal fault

0 引言

为了有效地监测电气设备运行过程中的热故

障,红外热成像技术被广泛地应用于电气设备监测中。虽然红外热成像设备将温度场信息转化为可视化的红外图像信息^[1],但是无法准确定位高温所在区域。目前对红外热图像研究大部分在对图像的增强与去噪、

收稿日期:2016-12-23

基金项目:上海市高校教师创新基金资助项目(1S10302020)

作者简介:肖儿良(1969-),男,湖南邵阳人,博士,硕士生导师,主要从事数据融合、嵌入式系统、智能电网方面的研究。E-mail: xiaerliang@usst.edu.cn

与可见光图像的配准等前期的处理中^[2-3]。有学者提出了采用彩色图像融合的方法来定位热故障区域的准确位置,将可见光图像与红外热图像融合^[4],使得热故障区域能够在可见光的背景下能够被准确定位。图像融合主要是对多个传感器获得的多幅图像通过融合算法进行融合^[5]。

有学者对彩色图像融合也做了相关的研究,麻省理工学院林肯实验室的FAY等^[6]对微光与可见光的伪彩色图像融合进行了研究,将图像的彩色通道空间信息映射为夜视和低光信息,为融合图像着色,缺点是会丢失一部分可见光的直观信息。TOET等^[7]提出了一种基于颜色传递技术的伪彩色图像融合方法,但是在RGB和 $\alpha\beta$ 空间之间的相互转换中需要大量的乘法运算、对数和指数运算,增加了系统的存储要求和计算复杂度;另外这种方法会破坏图像中的纹理和细节信息,并且融合图像的颜色与参考图像有很大的关系,有可能造成色彩失真。以上的方法均有融合效果不佳或者计算数据量大的缺点。

有研究人员将彩色图像融合的方法运用于电气设备热故障区域的定位中,将压缩感知理论应用于加权彩色图像融合。CANDES, TAO和DONOHO等^[8-9]在2006年提出压缩感知理论,该理论由于较低采样率使得采样得到的数据量比较小,这为数据的后期传输、处理和存储减小了压力。

针对以上的问题,本研究将提出一种基于压缩感知理论框架的红外与可见光的彩色图像加权融合方法。

1 压缩感知理论

压缩感知理论主要包括3方面的问题:稀疏表示、测量矩阵的构建、信号的稀疏重构。压缩感知理论用矩阵形式描述的线性测量模型,表述如下:

在时域范围内,大多数信号均为非稀疏的状态,如果通过某种变换将其转换到另一个变换域中这可能是稀疏的。假设有一个 N 维信号 $x \in \mathbf{R}^{N \times 1}$,用正交基 $\Psi \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 线性表示为^[10]:

$$x = \Psi\theta \quad (1)$$

式中: Ψ —正交基, $\Psi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \in \mathbf{R}^{N \times N}$; θ —加权稀疏序列, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N] \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 。

如果 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 中只有较少的大系数,则可称 N 维信号 x 是压缩的;如果其中只有 K 个非零元素,则称 θ 为信号 x 的 K 阶线性稀疏表示。

压缩感知理论用线性投影来实现对 N 维信号 x 的

测量,将式(1)代入下式中可得:

$$y = \Phi x = \Phi\Psi\theta \quad (2)$$

式中: Φ —测量矩阵, $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$,其中 $M \ll N$ 。

为了简便,将测量矩阵 Φ 与正交基矩阵 Ψ 的积定义为传感矩阵 A^{CS} ,即为 $A^{CS} = \Phi\Psi$,可以得到:

$$y = \Phi x = \Phi\Psi\theta = A^{CS}\theta \quad (3)$$

由此可见,压缩采样将 N 维信号 x 变为测量值信号 y ,信号 y 为 M 维,说明采样之后的信号维数降低了。如何从测量信号 y 重构出原始信号 x 就是亟待解决的问题。从本质上看这是一个病态问题,理论上有无穷个解。根据压缩感知理论,当信号 x 是 K 阶稀疏且传感矩阵 A^{CS} 满足一定条件时,信号 x 可由测量值 y 通过求解最优 l_0 范数问题精确重构,则:

$$\hat{x} = \arg \min_x \|\Psi^T\|_0, \text{ s. t. } \Phi x = y \quad (4)$$

式中: $\|\cdot\|_0$ — l_0 范数。

CANDES等指出,若要精确地重构 K 阶稀疏信号 x ,测量次数 M 必须满足 $M = cK \log(N)$,并且传感矩阵必须满足约束等距性(RIP)条件。对于任意 K 阶稀疏信号 s 和常数 $\delta \in (0, 1)$,如果满足下式:

$$(1 - \delta) \|s\|_2 \leq \|A^{CS}\|_2 \leq (1 + \delta) \|s\|_2 \quad (5)$$

则传感矩阵 A^{CS} 满足RIP条件,它要求测量矩阵 Φ 和正交基 Ψ 互不相关。如果测量矩阵满足上述条件,就可以恢复出原始信号。

2 基于压缩感知的红外与可见光彩色图像加权融合算法

应用压缩感知理论,本研究分别对被小波基稀疏后的红外与可见光图像数据进行测量,得到稀疏图像数据的测量数,利用权重因子,设计了加权融合规则,通过求解凸优化问题恢复出图像数据,最后得到融合的彩色图像。

2.1 稀疏基的选择

压缩感知指出,信号的稀疏性是保证恢复出原始数据的前提,合适的稀疏基能够确保系数有足够的稀疏性,提高数据恢复的精度。原始的图像信号大多不是稀疏信号,但均可以被压缩,在变换域中大部分信号都有稀疏性。图像和视频信号常用到的稀疏基为离散余弦变换基(DCT)、小波变换基(DWT)、快速傅里叶变换基(FFT)等。与离散余弦变换基(DCT)和快速傅里叶变换基(FFT)相比,小波变换基(DWT)具有更好的稀疏性,运用小波稀疏基能够确保图像的稀疏表达和图像重构恢复精度,使得重构的融合图像恢复得更加精确,图像质量更高,本研究中用到的变换基为小波稀疏基。

2.2 测量矩阵的选择

在图像数据经过小波稀疏基稀疏化以后,就需要测量矩阵对稀疏的图像信号进行测量,获得测量值。观测矩阵必须与稀疏基不相干,对于 $M \times N$ 维的高斯随机的测量矩阵 Φ ,只需 $M \geq cK \log(N)$ (c —常数, K —稀疏度),即可从测量值中恢复出原始的图像信号^[11]。测量矩阵常用的有贝努利矩阵、Toeplitz 矩阵、高斯随机矩阵,而随机矩阵的优越性就在于其具有与任何稀疏基都不相干的特点,因此笔者采用高斯随机矩阵作为本研究的测量矩阵。

2.3 重构算法

从测量值信号中重构出原始信号是压缩感知理论中的重要步骤,目前常用的重构方法有匹配追踪法(matching pursuit, MP)、基追踪(basic pursuit, BP)、和正交匹配追踪法(orthogonal matching pursuit, OMP)等^[12]。正交匹配追踪算法是一种贪婪算法,通过贪婪迭代的方法选择测量矩阵中的列,使选择的列在每次迭代中与测量信号有最大的相关性,将相关的

部分从测量信号中减去,再反复迭代至次数达到稀疏度 K 后停止。这种方法提高了重构速度,能够较快的对图像信号进行重构,基于这种特性,本研究重构算法采用正交匹配追踪算法。其算法流程如下:

- (1) 初始化各参数:残差初始化,索引集为空;
- (2) 找出残差和感知矩阵每列内积最大的列,即: $\lambda_k = \operatorname{argmax}_{j=1 \dots N} |r^{k-1}, \Psi_j|$;
- (3) 更新索引集 $\Lambda_k = \{\Lambda_{k-1}, \lambda_k\}$,并更新找到的感知矩阵中的重建原子即: $\Phi_k = \{\Phi_{k-1}, \varphi_{\lambda_k}\}$;
- (4) 应用最小二乘法求最近逼近,即: $\hat{x}_k = \operatorname{argmin} \|y - \Phi_k \hat{x}_k\|_2$;
- (5) 更新迭代残差值, $r_k = y - \Phi_k \hat{x}_k, k = k + 1$;
- (6) 判断是否满足迭代停止条件,满足则停止迭代;不满足,返回第(1)步。

2.4 算法实现

基于压缩感知理论的彩色图像加权融合算法的具体实现如图 1 所示。

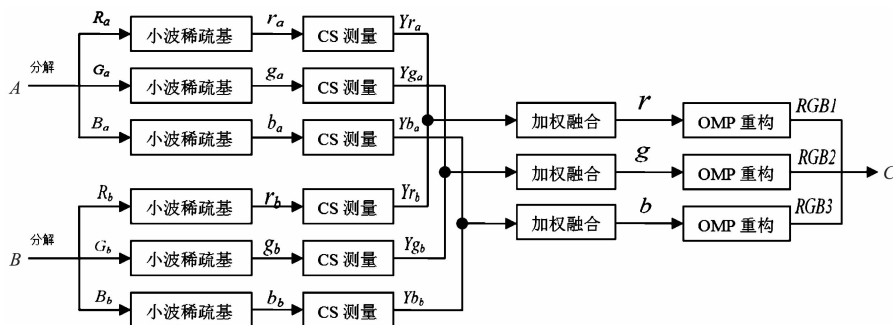


图 1 基于 CS 理论的彩色图像加权融合框架

设 A 为伪彩色红外图像, B 为可见光彩色图像, C 为融合后的图像。具体算法步骤如下:

- (1) 将伪彩色红外图像和彩色可见光图像分别分解为 3 个通道 R, G, B ;

图像 $A: \{R_a, G_a, B_a\}$ 图像 $B: \{R_b, G_b, B_b\}$

- (2) 分别对分解后的图像数据 R_a, G_a, B_a 和 R_b, G_b, B_b 进行小波变换, 图像数据被映射到一个稀疏向量中。稀疏的图像数据为 r_a, g_a, b_a 和 r_b, g_b, b_b ;

- (3) 构造 $M \times N$ ($M \ll N$) 维的高斯随机测量矩阵 Φ ;

- (4) 通过测量矩阵 Φ 获取稀疏数据的测量值。

$$Y_{Ra} = \Phi \times r_a \quad Y_{Rb} = \Phi \times r_b$$

$$Y_{Ga} = \Phi \times g_a \quad Y_{Gb} = \Phi \times g_b$$

$$Y_{Ba} = \Phi \times b_a \quad Y_{Bb} = \Phi \times b_b$$

- (5) 通过权重因子 α 和 β 对图像测量值进行融合;

$$\begin{cases} r = \alpha Y_{Ra} + \beta Y_{Rb} \\ g = \alpha Y_{Ga} + \beta Y_{Gb} \\ b = \alpha Y_{Ba} + \beta Y_{Bb} \end{cases}$$

- (6) 运用正交匹配追踪算法(OMP)对相应的 3 个通道进行图像的重构;

$$\begin{cases} RGB_1 = OMP(r) \\ RGB_2 = OMP(g) \\ RGB_3 = OMP(b) \end{cases}$$

- (7) 将得到的三通道重构数据恢复为融合后的彩色图像。

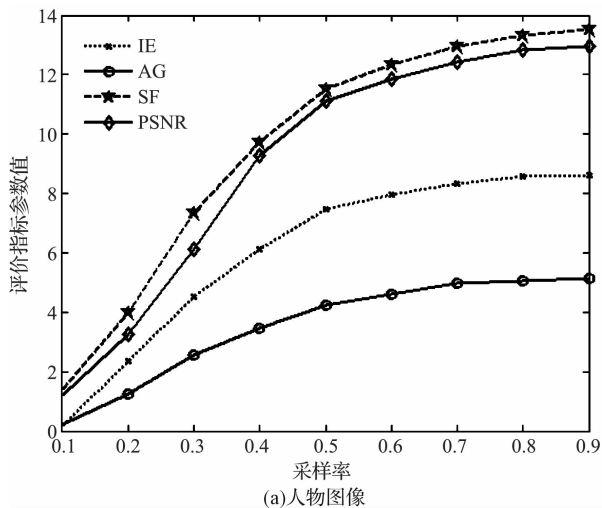
3 实验结果与分析

3.1 实验结果

笔者运用 Matlab 实验平台, 针对本研究方法与小波变换融合方法、加权融合方法进行了比较与分析。

实验中所用到的图像由红外相机和可见光相机在相同位置拍摄,图像的配准已经完成,其中红外图像为伪彩色图像,可见光图像为彩色图像。实验一为人物的红外与可见光的图像融合实验,该人物图像细节丰富,边缘清晰,故作为验证融合效果的对象,该图像大小为 512×512 。实验二为高密度数据中心开关组件的热像图与可见光图像的融合,图像大小为 512×512 。

为了研究采样率和图像重构质量之间的关系,笔者在进行实验一和实验二之前先对人物图像和开关组件图像分别进行融合实验。融合权重均为 0.5 和 0.5,



调整随机测量矩阵 Φ 的 M/N 值,选择 M/N 的值分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,即对应的图像采样率为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。本研究得到融合图像后,运用以下几项图像质量评价指标参数进行质量评估,分别为熵 (IE)、平均梯度 (AG)、空间频率 (SF)、峰值信噪比 (PSNR)。这几项参数值越大,则表明重构得到的图像质量越高。

最终将得到的数据绘制成在不同采样率下,各评价指标参数值的曲线图,如图 2 所示。

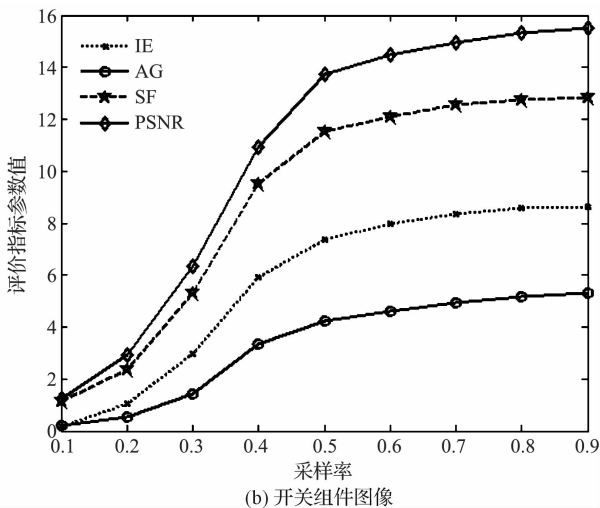


图 2 不同采样率下融合图像的重构质量评价指标参数

图 2 中,图像的采样率在 10% ~ 90% 变化时,随着采样率的升高,图像的各项质量评价指标参数均在提高。当采样率小于 50% 时,随着采样率的升高,指标参数值曲线的梯度较大,其值增大非常明显;当采样率大于 50% 时,曲线变化较为平缓,指标参数值增幅较小。上述实验及分析表明,随着采样率的提高,重构图像的质量在提高,但是提升的幅度在减小。综合考虑数据量与重构图像的质量的关系,采样率选择 50% 较为适宜。

为了比较融合效果,基于小波变换的图像融合方法和加权融合方法均采用传统的奈奎斯特采样,采样率为 100%。两组实验中加权融合方法的融合图像权重值为 0.5 和 0.5。由图 1 可知,与本研究融合方法的步骤上节已经提出,其中两组实验中测量矩阵中 $M = 256$,选择此时 M/N 为 0.5,即得到的测量数据为原图像数据量的一半,采样率为 50%;权重因子 α 和 β 的值分别为 (0.1, 0.9), (0.2, 0.8), (0.3, 0.7), (0.4, 0.6), (0.5, 0.5), (0.6, 0.4), (0.7, 0.3), (0.8, 0.2), (0.9, 0.1)。

实验一结果如图 3 所示。



图 3 本研究算法与小波变换的人物图像融合结果

实验二结果如图 4 所示。

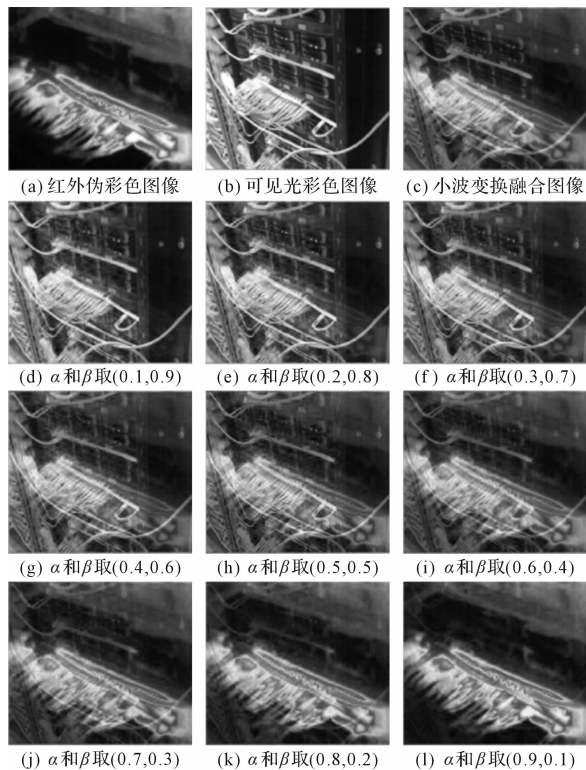


图 4 本研究算法与小波变换的开关组件图像融合结果

笔者将实验一和实验二中的基于加权融合算法的融合图像与本研究提出的基于压缩感知加权融合算法的融合图像进行比较,选取融合权重为0.5和0.5的图像作为比较对象,融合结果如图 5 所示。

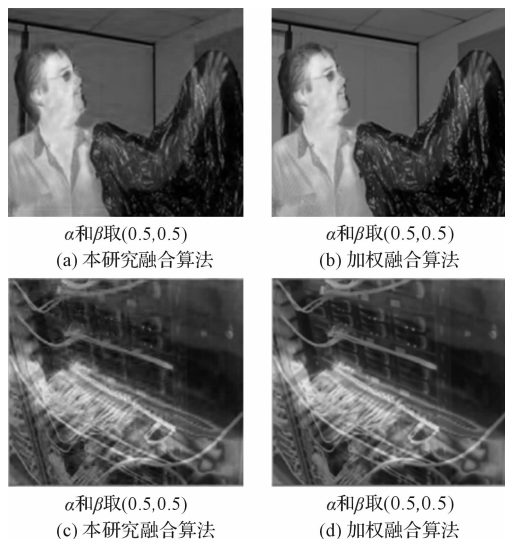


图 5 本研究算法与加权算法的融合图像结果

3.2 融合质量评价分析

从主观视觉角度出发,3 种方法均可以清楚的看见高温区域的红外伪彩色信息以及可见光的信息,图 3 中人物融合图像图 3(h)和图 3(c)均能够轻易分辨出被黑色袋子挡住部分手臂的位置和手势,但图 3(c)

中过多地保留了红外图像的黑色背景元素,导致图像偏暗,而且伪彩色温升区域颜色有失真现象;图 4 中开关组融合图像图 4(c)中高温伪彩色区域将线路纹理覆盖,不能确定温升区域具体所在线路位置,可能给巡检造成一定的误判;而本研究所用的方法可通过调节融合权重来调整红外与可见光图像的融合比例,可以达到观察具体温升开关线路位置的目的。图 5(a)和 5(b),图 5(c)和 5(d)从视觉效果上看几乎相同,可见光与红外热图像的颜色信息未失真,保留的信息较为完整。

本研究分别采用平均梯度、峰值信噪比、空间频率以及信息熵来对融合图像进行评价。

(1)平均梯度(average gradient, AG)^[13]。衡量图像对细节纹理的表达能,其值越大,说明对比度越大,图像越清晰;

(2)峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)。衡量融合图像相对于标准参考图像灰度的偏离程度其值越大,说明融合图像和标准参考图像的差异越小,融合效果越好;

(3)空间频率(spatial frequencies, SF)。衡量图像在空间域中的总体活跃程度,该值越大,则表示图像张的细节信息越多,融合质量越高;

(4)信息熵(information entropy, IE)^[14]。衡量图像的信息量数值,其数值越大,则表明图像中的信息量越丰富,融合效果越好。

基于本研究方法的融合图像在权重值为 0.5 和 0.5 时的融合效果较好,既包含红外热图像的温升区域信息,又包含了可见光的信息,融合权重适中,所以笔者选择权重因子为 0.5 和 0.5 的融合图像作为客观评价的对象;作为对比的融合图像采用小波变换法和加权融合法。客观评价数据如表 1、表 2 所示。

表 1 人物图像融合的客观评价指标

method	IE	AG	SF	PSNR
CS-weighted	7.273 3	4.112 6	12.128 7	11.528 7
DWT	7.407 3	4.359 8	12.476 5	11.721 2
weighted	7.378 6	4.364 5	12.343 2	11.632 4

表 2 开关组件图像融合的客观评价指标

method	IE	AG	SF	PSNR
CS-weighted	7.384 5	4.223 5	11.529 8	13.821 4
DWT	7.503 3	4.432 2	11.863 2	14.007 5
weighted	7.453 2	4.386 8	11.735 8	14.115 8

人物和开关组件图像针对不同融合方法的客观标评指标分别如表 1、表 2 所示。从表 1、表 2 中数据可以看出,基于本研究方法在采样量为 50% 的情况下在各个评价函数结果中与全采样的小波变换融合法以及

加权融合法相当。说明基于本研究算法在少于常规方法的采样数的情况下,融合图像的清晰度,信息量与另两种融合方法相当。

5 结束语

本研究提出了一种基于压缩感知的红外与可见光彩色图像融合算法。运用压缩感知理论,将图像的采样率降至常规全采样方式的50%,减小了彩色图像数据融合时的处理量;另外,可根据需要调整权重因子来控制红外与可将光图像融合的比例,方便故障区域的准确定位。针对电气设备的红外热像图进行了实验,并与常规的小波融合算法和加权融合算法进行了比较分析。

仿真实验表明,所采用的融合算法视觉效果好,在评价指标上也与传统融合方法相当,数据处理量少、算法结构简单、易于硬件实现。

参考文献 (References):

- [1] MILIC S D, ZIGIC A D, PONJAVIC M M. Online temperature monitoring, fault detection, and a novel heat run test of a water-cooled rotor of a hydrogenerator[J]. *Energy Conversion*, 2013, 28(3): 698-706.
- [2] 李艳梅,陈雷霆,饶云波,等. 基于双变换的红外与可见光图像融合增强[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(10): 3142-3145.
- [3] FAN S, YANG S, HE P, et al. A fast self-adaptive algorithm for the enhancement of infrared electric image[J]. *Energy Procedia*, 2011(12): 711-717.
- [4] 张秀伟,张艳宁,郭 哲,等. 可见光-热红外视频运动目标融合检测的研究进展及展望[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(4): 354.

- [5] BLUM R S, ZHENG Liu. Multi-sensor image fusion and its applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [6] FAY D A, WAXMAN A M, IRELAND D B, et al. Fusion of multisensor imagery for night vision: color visualization, target learning and search [C]// 3rd International Conference on Information Fusion, New York: IEEE, 2000.
- [7] TOET A. Natural color mapping for multiband nightvision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(3): 155-166.
- [8] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] CANDÈS E, TAO T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [10] WAN Tao, NISHAN C, ALIN A. Compressive image fusion [C]// Proc of the 15th IEEE International Conference on Image Processing, New York: IEEE, 2008.
- [11] LIN T, YU P. Adaptive two-pass median filter based on support vector machines for image restoration[J]. *Neural Computation*, 2004, 16(2): 333-354.
- [12] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition [C]// 1993 Conference Record of The Twenty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, New York: IEEE, 1993.
- [13] 王海晖,彭嘉雄,吴 魏. 基于小波包变换的遥感图像融合算法[J]. *中国图像图形学报*, 2002, 9(7): 922-937.
- [14] 路雅宁,郭 雷,李晖晖. 基于曲波活性测度的 SAR 与多光谱图像融合[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(11): 4360-4363.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

肖儿良,黄元松. 压缩感知图像加权融合算法在热故障监测中的应用[J]. *机电工程*, 2017, 34(6): 674-679.

XIAO Er-liang, HUANG Yuan-song. Application of weighted image fusion based on compressed sensing in thermal fault monitoring[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6): 674-679.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>