

基于 FCM 聚类的示温漆图像分割算法

王 展¹, 杜平安¹, 李 杨², 周 峰³

- (1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 611731;
2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703;
3. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 根据示温漆(TIP)图像特征及相关实验结果,提出了一种基于模糊 C 均值(FCM)聚类的示温漆图像分割算法。该算法以 FCM 聚类算法为核心,应用双边滤波器平滑图像,提高图像分割质量。通过颜色空间转换,提高图像聚类的迭代效率。实验表明:该算法增强了示温漆温度判读需要的特征信息,可以提取人眼无法识别的等温线,同时消除了等温线崎岖等现象,测温误差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。算法应用效果良好,满足工程要求,已用于示温漆自动判读软件开发。

关 键 词: 示温漆 (TIP); 温度测试; 图像分割; 等温线; 聚类算法; 图像平滑

中图分类号: V235.1 **文献标志码:** A

Segmentation algorithm for temperature indicating paint image based on FCM clustering

WANG Zhan¹, DU Pingan¹, LI Yang², ZHOU Feng³

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China;
3. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: According to the image features and the related experimental results, a temperature indicating paint (TIP) image segmentation algorithm based on fuzzy C-means (FCM) clustering was proposed. Taking the FCM clustering algorithm as the core, the algorithm employed the bilateral filter to smooth the image to improve the segmentation quality. The color space conversion was used to improve the iterative efficiency of the image clustering. Experiments showed that the algorithm can enhance the feature information needed in the process of the interpretation of the TIP. The algorithm can extract isotherms that can't be recognized by naked eye and the temperature measurement error was $\pm 10^{\circ}\text{C}$. The algorithm has good application effect and meets the engineering requirements, so it has been applied to the development of automatic interpretation software for TIP.

Key words: temperature indicating paint (TIP); temperature measurement; image segmentation; isotherm; clustering algorithm; image smooth

收稿日期: 2016-09-26

作者简介: 王展(1988—),男,博士生,主要从事图像处理,模式识别相关研究。

引用格式: 王展,杜平安,李杨,等. 基于 FCM 聚类的示温漆图像分割算法[J]. 航空动力学报,2018,33(3):604-610. WANG Zhan, DU Pingan, LI Yang, et al. Segmentation algorithm for temperature indicating paint image based on FCM clustering[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 604-610.

示温漆是一种特殊配方的涂料,它能随外界温度的变化而改变自身颜色,且颜色的变化确定。利用示温漆颜色的改变反推温度大小,从而形成一种温度测量方法,广泛用于航空发动机热端部件的温度测试。目前,国内外针对示温漆图像判读的相关研究较少,具体思路主要分为两种,一种是基于区域内像素值的判读,另一种是基于颜色区域间等温线的判读。先前的研究主要集中于前者^[1-6]。但是实践表明,基于区域颜色值的方法极易受到光照条件,拍摄环境以及示温漆自身污染等因素的影响。而且所得温度值源于色温曲线的拟合,并不是真实的测试结果,因此稳定性差。本文针对基于等温线的判读方法。通过图像算法,精确的提取并修正等温线,根据每条等温线两侧的颜色匹配关系得到测试结果反应的整个温度场。

图 1 为发动机热端部件的示温漆图像,由于部件不同部位温度不同,因此示温漆变化为不同的颜色。图中颜色交界线为等温线,提取等温线并关联对应的温度值,便可判读部件表面温度^[1-8]。

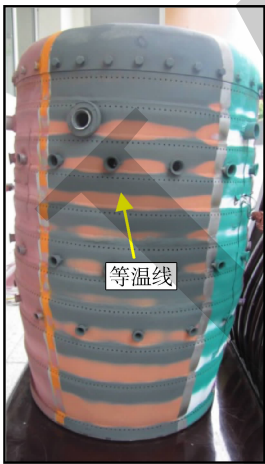


图 1 发动机热端部件涂覆示温漆的效果
Fig.1 TIP result of engine hot component

示温漆温度判读的关键是如何从图像中提取高质量的等温线。由于示温漆图像颜色之间过渡模糊,等温线不明显,为等温线提取带来了困难。实验证明,对示温漆图像的颜色区域进行准确有效的分割,可以提供优良的等温线特征,从而为等温线提取提供必要条件。文献[9-10]提出依据 K-means 聚类算法进行示温漆图像分割。本文在此基础上提出一种基于模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)的示温漆图像分割算法,将测温结果图像分割为独立的色块,进而得到精确的等温

线信息。
本文内容包含 3 个部分。首先通过实验分析,对比了原有的 K-means 聚类的效果。提出应用 FCM 聚类算法对示温漆图像的像素值数据聚类,完成图像分割;同时,提出一种针对示温漆图像特点的滤波方法,用于修正等温线;最后实验分析了颜色空间对分割效果的影响,并通过颜色空间转换进一步提高聚类分割的效果。

1 示温漆图像的聚类分割算法

由于示温漆图像等温线位置的像素局部梯度值较大,因此可以应用边缘提取算法提取等温线(如 Canny 算子)。但是,对原始图像做边缘提取的结果中往往包含大量无效信息,如部件中孔洞的结构边缘以及示温漆杂质产生的孤立点等。这些干扰对后期温度判读会产生不利影响。实验发现,示温漆图像中同一区域内的颜色值接近,可视为一类颜色(见图 2)。根据这一特征,可运用聚类算法对图像中各个颜色区域进行分割与整合,以排除干扰信息并突出等温线特征。图 3(a)、图 3(b)是图像有无聚类的边缘提取效果,可见聚类后的示温漆图像等温线清晰独立,大量无效信息被算法排除。经聚类处理的示温漆图像如图 3(c)所示,等温线与原图像结合效果见图 3(d),图中示温漆颜色交界线全部被提取出来。

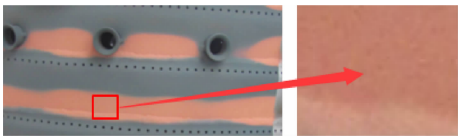


图 2 某示温漆图像局部
Fig.2 Local of a TIP image

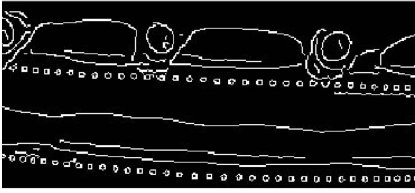
本节讨论 K 均值聚类(K-means)与 FCM 聚类两种算法,两者均属于无监督的机器学习算法,由于效率较高,目前应用较广^[11-13]。

1.1 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法是一种硬聚类,它通过计算样本元素与聚类中心的距离直接判断该元素是否属于某一类。实现流程如下:

步骤 1 计算全部样本元素与聚类中心的距离,按距离最近原则对元素进行归类。这一判别方法所得到的结果只有“属于”或“不属于”,即可视为得到一个 0-1 矩阵。

步骤 2 判断类内平均值与聚类中心是否相



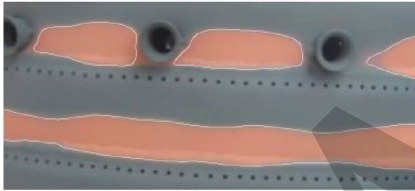
(a) Canny算子边缘提取结果



(b) 聚类后的边缘提取结果



(c) 示例图像聚类效果



(d) 等温线与原图像结合效果

图 3 示温漆聚类分割效果对比

Fig. 3 TIP image segmentation result using clustering algorithm

同。若相同则收敛,若不相同执行步骤 3。

步骤 3 根据聚类结果,取同类中的样本平均值代替原始聚类中心。

如此反复迭代,直至收敛,完成聚类。实际应用中收敛条件一般为类内均值与聚类中心之差小于阈值,或达到规定的迭代次数。

1.2 FCM 聚类算法

FCM 聚类算法的核心思路与 K-means 算法大致相同,不同的是 FCM 算法是一种模糊聚类,每轮迭代中不再规划样本元素究竟属于哪一类,而是以概率的形式表现样本属于每个类别的程度。其权重矩阵也不再是 0-1 矩阵,而是计算全样本对应每一个聚类中心的隶属度矩阵。其核心收敛原则采用经典的误差平方和准则,即目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^k J_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N \omega_{ji}^m d(x_j, c_i) \quad (1)$$

式中 k 为聚类数目, N 为样本元素总数, x_j 为样

本中第 j 个元素, c_i 为第 i 个聚类中心, $d(x_j, c_i)$ 表示该元素与聚类中心的距离,此处一般取欧氏距离

$$d(x_j, c_i) = \|x_j - c_i\|^2 \quad (2)$$

式(1)中 ω_{ji} 为 x_j 对应 c_i 的隶属度, m 为权重指数(本文取经典值 2), ω_{ji} 应满足

$$\sum_{i=1}^k \omega_{ji} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (3)$$

隶属度矩阵尺寸为 $N \times k$,其中各个元素由式(4)得出

$$\omega_{ji} = \frac{1}{\sum_{s=1}^k \left(\frac{\|x_j - c_i\|^2}{\|x_j - c_s\|^2} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (4)$$

得到隶属度矩阵后,结合样本元素,由式(5)对聚类中心 c_i 进行修正

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_{ji}^m x_j}{\sum_{j=1}^N \omega_{ji}^m} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)反复迭代修正,直至目标函数 J 最小。一般地,算法收敛条件为前后两次迭代聚类中心之差小于阈值,或达到规定的迭代次数。

在进行示温漆图像分割时,所处理的对象为三通道的颜色值,即三维向量。以 RGB(red-green-blue)颜色空间为例,设聚类中心 $p_i(R_i, G_i, B_i)$, $\forall i = 1, \dots, k$,目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N \omega_{ji} \cdot \sqrt{(R_j - R_i)^2 + (G_j - G_i)^2 + (B_j - B_i)^2} \quad (6)$$

迭代结束后按照隶属度最大原则,将全部像素分别归属于对应的类别。然后将聚类中心值(三通道的颜色值)赋值给属于该类内的全部像素,最终得到分割图像^[14]。

1.3 两种算法的实验对比分析

示温漆图像如图 4(a)所示。实验中两种算法的初始聚类中心一致,迭代次数均为 10 次。实验结果如图 4 所示,可见在相同聚类条件下, K-means 聚类结果中多处出现明显的过度分割。实验发现,图 4(b)左侧“青色”区域实际为一个温度区间,红线所指位置温度均为 720 °C,但是 K-means 算法结果将其错误的分为了两类。图像的过度分割会产生多余的边缘,进而干扰等温线的提取。同样条件下 FCM 聚类的分割效果更为理想。如图 4(c)所示,FCM 聚类将前者错误划分的区域成功合并为一类,整个“青色”区域变得统

一,没有发生过度分割。由算法差异分析可知,产生这种差别的原因是由于 K-means 算法将元素硬性地将规定为某一类,导致可用于修正聚类中心的元素只有上次迭代所得到的一小部分。而 FCM 算法将样本元素按照相关性计算了隶属度,即得到了每个元素对应各个聚类中心的关联性,从而保留了更多信息。因此 FCM 算法中每一个聚类中心的修正都由样本中全部元素参与,结果也更为精确。

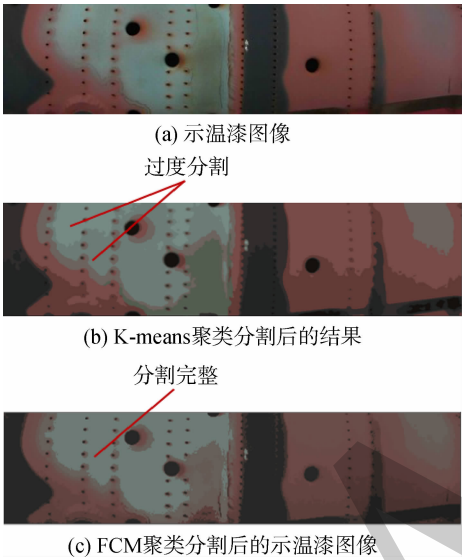


图 4 两种聚类算法分割示温漆图像的结果
Fig. 4 TIP image segmentation results of two clustering algorithms

两种聚类方法对等温线提取效果的影响见图 5。由图 5(a)可见,部分区域由于 K-means 算法的错误分割,产生了大量无效边缘,即非等温线。而 FCM 算法处理结果的中央区域比较完整,去

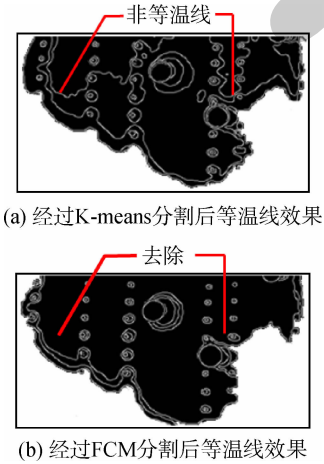


图 5 示温漆局部等温线提取效果
Fig. 5 Local isotherm extraction result of TIP

除了无效边缘,更符合真实的测试结果,效果如图 5(b)。

2 示温漆图像平滑与颜色空间的选择

为进一步提高图像的聚类分割效果,本节进一步分析示温漆图像的平滑算法和颜色空间的选择。

2.1 示温漆图像的平滑处理

由于示温漆材质不均匀,被测部件表面也不能达到绝对平滑,示温漆图像中统一颜色区间内的颜色接近但不均匀,往往会产生多余的纹理信息,如图 6 所示。这种现象严重时会影响聚类质量,示温漆图像聚类后,图像右侧位置出现了大量杂点,等温线杂乱崎岖,无法提取精确的等温线。

通过滤波器进行图像平滑,可以去除这种同一颜色区域内无效的纹理信息。但图像滤波同时也会使图像边缘信息丢失,导致等温线破坏。为此本节应用双边滤波器(bilateral filter)进行示温漆图像平滑处理^[15-18]。双边滤波器由两个函数构成,一个根据空间域上的距离计算得到,主要用于图像平滑;另一个在值域上由像素值距离计算得到,用于保证梯度较大位置的像素不被破坏,可以控制边缘不丢失。因此双边滤波器在平滑图像的同时尽可能保留边缘信息,符合示温漆这一对象的特殊需求。

双边滤波器中涉及的两种距离均取欧氏距离,空间域函数可取高斯滤波器

$$c(i,j,x,y) = \exp\left[-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_d^2}\right] \tag{7}$$

值域函数为

$$s(i,j,x,y) = \exp\left[-\frac{\|f(i,j) - f(x,y)\|^2}{2\sigma_r^2}\right] \tag{8}$$

当滤波器遇到边缘位置像素时,由于边缘附近的像素值梯度较大,导致值域函数值相应较大,从而防止了该区域被过度模糊。

双边滤波器在示温漆图像上的实验效果见图 6。图 6(a)为原始图像,经双边滤波后图像变得更加平滑,去除了同一颜色区域内绝大多数的无效纹理信息,同时保留了示温漆变色位置的等温线信息,效果见图 6(b)。由图 6(c)、图 6(d)对比可见,等温线位置的杂点被去除,等温线崎岖的现

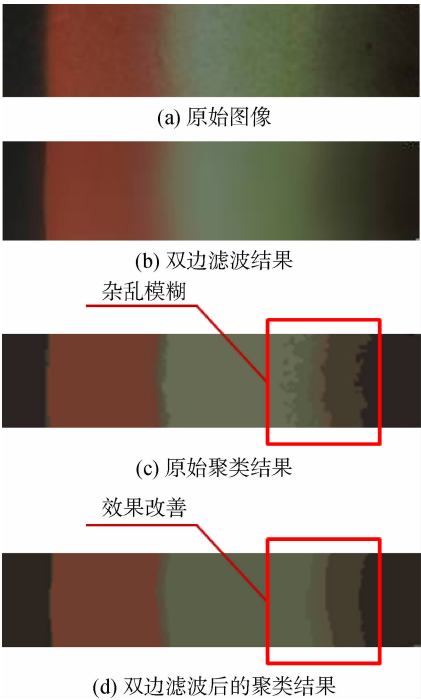


图 6 双边滤波器实验结果

Fig. 6 Bilateral filter experiment result

象消失。

2.2 图像分割的颜色空间选择

颜色空间是彩色图像信息处理的基础,合理选择颜色空间可以提高图像分割的质量与效率。本节实验分析了颜色空间对聚类效果的影响。

实验选取有代表性的 RGB、YUV(亮度-色度)及 CIELab(亮度-红绿分量-黄蓝分量)三种颜色空间,分别在不同空间中对大量示温漆图像进行 FCM 聚类分割,迭代次数均为 10 次。由于算法处理对象是示温漆图像,样本对象的数据即自然光中的色彩,样本形式固定。为保证初始条件一致,将初始聚类中心固定为颜色环中的 12 种颜色,如表 1 所示,表中 R 、 G 、 B 分别表示红色色值、绿色色值、蓝色色值。这些初始聚类中心在颜色域中平均分布,可有效覆盖样本范围。

实验结果对比如图 7 所示。在每个聚类结果图像中随机选取 4 个坐标点的像素值,分别比较其对应原始图像的像素值误差,以验证聚类中心的准确性,对比结果见表 2。由表 2 可知,在相同迭代条件下,CIELab 颜色空间内图像聚类结果像素值误差小于其他两种。通过颜色空间转换,聚类后颜色值的误差平均降低了 8.17%。

表 1 初始聚类中心
Table 1 Original cluster centers

色值												
B	0	0	0	0	0	0	0	255	255	255	255	102
G	0	51	102	153	255	255	255	255	0	0	0	0
R	255	255	255	255	255	153	0	0	0	102	255	255

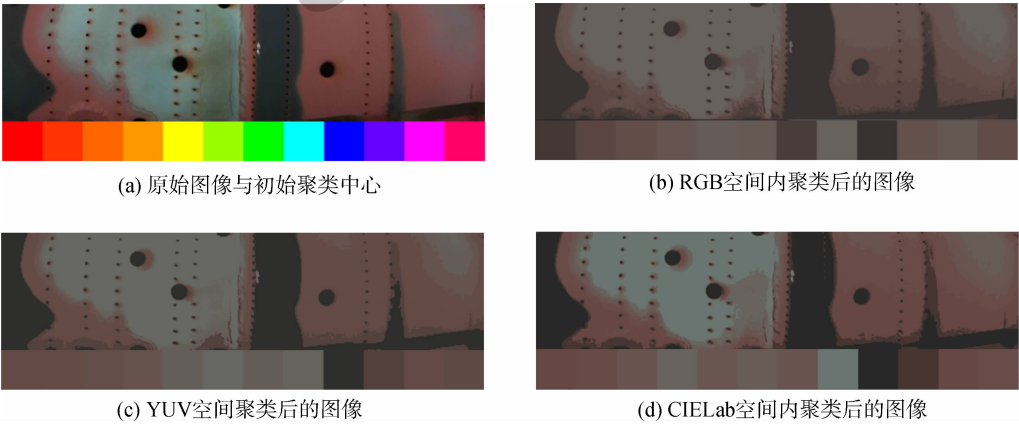


图 7 示温漆图像在不同颜色空间下的聚类效果

Fig. 7 Clustering results in different color spaces of TIP image

表 2 示例图像通过不同颜色空间处理的色值误差
Table 2 Color value error in different color spaces of sample images

颜色 空间	像素点 1				像素点 2				像素点 3				像素点 4		
	通道 1	通道 2	通道 3	误差/ %	通道 1	通道 2	通道 3	误差/ %	通道 1	通道 2	通道 3	误差/ %	通道 1	通道 2	通道 3
	R	G	B		R	G	B		R	G	B		R	G	B
原始值	124	77	71		107	122	117		108	90	88		34	42	44
RGB	100	81	75	1.01	103	97	91	15.48	103	97	91	4.89	56	49	47
YUV	100	74	67	0.96	101	104	96	12.77	101	92	86	3.66	46	45	41
Lab	105	75	70	0.64	105	117	111	3.70	104	92	86	2.73	39	40	38

3 实验与结论

结合温度判读算法,对本文算法的分割效果进行了实验。其中某型号示温漆试片测试结果如图 8 所示,图中 t 表示温度。其中图 8(a)为原始测试图像,图 8(b)为人工识别等温线效果。实验发现,由于 620~940℃ 温度段内变色不明显,导致其中存在的一条 861℃ 的等温线缺失(图 8(b)中红框标注位置)。经由本文算法处理后,成功提取出了该等温线,细化了温度区间,使判读结果更为精确。对比热电偶读数,本文测试方法测量精度达±10℃。实验表明,本文算法可以提取出人工无法提取的等温线。

为准确提取示温漆图像的等温线,提高温度自动判读精度,本文提出一种基于 FCM 聚类的图像分割算法,同时对图像进行滤波平滑处理和颜色空间转换。算法增强了示温漆温度判读需要的特征信息,同时消除了等温线崎岖等现象,明显提高了等温线质量和提取效率。

本文算法精度可满足工程需求,已用于示温漆自动判读软件开发和航空发动机的温度测试。

参考文献:

[1] 李杨,李志敏,熊兵,等. 航空发动机涡轮叶片温度测量技术现状与发展[R]. 贵阳:第 15 届中国科协年会,2013.

[2] 李杨,陈洪敏,熊庆荣. 不可逆示温涂料的发展及应用[J]. 中国涂料,2010,25(5):16-19.

LI Yang, CHEN Hongmin, XIONG Qingrong. Development and application of irreversible temperature indicating coatings[J]. China Coatings, 2010, 25(5): 16-19. (in Chinese)

[3] 熊庆荣,朱国成,钟明. 三头部燃烧室火焰筒壁面温度测试研究[J]. 航空动力学报,2016,31(4):775-779.

XIONG Qingrong, ZHU Guocheng, ZHONG Ming. Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(4): 775-779. (in Chinese)

[4] FEIST J P, BISWAS S K K, PILGRIM C C, et al. Off-line temperature profiling utilizing phosphorescent thermal history paints and coatings[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 137(10): 1-8.

[5] LEMPEREUR C, ANDRAL R, PRUDHOMME J Y. Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19: 934-939.

[6] LORENZ M, HORBACH T, SCHULZ A, et al. A novel measuring technique utilizing temperature sensitive paint: measurement procedure, validation, application, and comparison with infrared thermography[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(3): 420-431.

[7] 马春武,姜斌,陈复扬. 示温漆温度自动判读与数字图像处

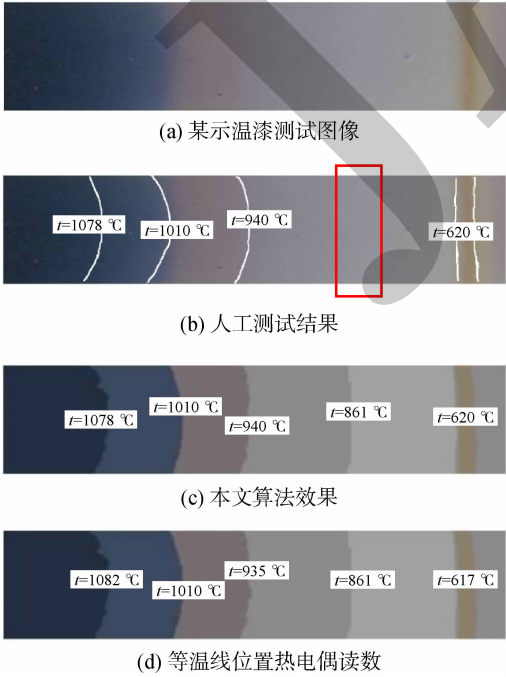


图 8 温度判读效果对比
Fig. 8 Comparison of temperature recognition results

理系统[J]. 航空发动机, 2007, 33(2): 12-14.

MA Chunwu, JIANG Bin, CHEN Fuyang. Automatic temperature interpretation and digital image processing systems of temperature sensitive paints [J]. Aeroengine, 2007, 33(2): 12-14. (in Chinese)

[8] 马春武, 张兴, 刘忠奎, 等. 一种示温漆温变颜色的自动识别方法; CN102313607B[P]. 2012-01-11

[9] 林茂松, 陈念年. 示温漆色彩量化及其图像分割算法研究[J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(2): 48-53.

LIN Maosong, CHEN Niannian. Research on color quantization and image segmentation of thermal paint[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2006, 21(2): 48-53. (in Chinese)

[10] 王荣华, 杜平安, 黄明镜, 等. 基于等温线温度识别的示温漆温度自动识别算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 542-547.

WANG Ronghua, DU Pingan, HUANG Mingjing, et al. Automatic recognition algorithm for temperature-sensitive paint's temperature based on isotherm temperature identification[J]. Journal of Electronic Measurement and instrument, 2010, 24(6): 542-547. (in Chinese)

[11] HUANG C W, LIN K P, WU M C, et al. Intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm with neighborhood attraction in segmenting medical image[J]. Soft Computing, 2014, 19(2): 459-470.

[12] 高新波, 李洁, 姬红兵. 基于加权模糊 C 均值聚类与统计检验指导的多阈值图像自动分割算法[J]. 电子学报, 2004, 32(4): 661-664.

GAO Xinbo, LI Jie, JI Hongbing. A multi-threshold image segmentation algorithm based on weighting fuzzy C-means clustering and statistical test[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 661-664. (in Chinese)

[13] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-means++: the advantages of careful seeding[C]// Proceedings of the 8th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New Orleans, Louisiana, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007: 1027-1035.

[14] PRABU C, BAVITHIRAJA S V M G, NARAYANA-MOORTHY S. A novel brain image segmentation using intuitionistic fuzzy C-means algorithm [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2016, 26(1): 24-28.

[15] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[R]. Bombay, India: International Conference on Computer Vision, 1998.

[16] KORNPROBST P, TUMBLIN J, DURAND F. Bilateral filtering: theory and applications [J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2009, 4(1): 1-74.

[17] DAI L, YUAN M, ZHANG X. Speeding up the bilateral filter: a joint acceleration way[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(6): 2657-2672.

[18] CHAUDHURY K N, DABHADE S D. Fast and provably accurate bilateral filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(6): 2519-2528.

(编辑: 王碧琚)