

高斯差分滤波图像融合方法

曾瀚林¹, 孟祥勇², 钱惟贤¹

- (1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 齐齐哈尔北方华安集团试验场, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: 图像融合是图像处理领域的重要内容之一。传统融合算法将源图像均做处理后按一定规则进行融合, 虽然能取得不错的融合效果, 但算法对图像的配准要求较高, 融合图像也普遍存在细节丢失、目标不够明显的问题。为了改善上述问题, 分析了红外图像和可见光图像的图像特性以及红外目标特性, 将目标检测引入图像融合, 利用高斯差分(DOG)滤波器提取红外图像中的目标, 通过多尺度 DOG 图像计算获得红外图像融合系数矩阵, 然后计算融合子图, 最终融合获得目标明显、细节保留较好的图像, 降低了对图像配准的要求。用五种常用评价指标以及信杂比和背景相似度对融合图像进行评估。实验结果表明, 所提出的算法在主观视觉和客观评价指标上都要优于常用的图像融合方法。

关键词: 图像融合; 目标检测; 高斯差分滤波器; 信杂比

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200091

Image fusion algorithm based on DOG filter

Zeng Hanlin¹, Meng Xiangyong², Qian Weixian¹

- (1. Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. Qiqihar North Hua'an Group Test Site, Qiqihar 161000, China)

Abstract: Image fusion is one of the important contents in the field of image processing. The traditional fusion algorithm fuses the source images and processes them according to certain rules. Although a good fusion effect can be achieved, the algorithm requires high image registration, then the fusion image also has the problem of loss of details, and the problem that the target is not obvious enough. To improve the above problems, the characteristics of the infrared image, visible image and the infrared target were analyzed, target detection was used in image fusion, and the DOG filter was used to extract the targets in the infrared image. The fusion coefficient matrix was obtained through multi-scale DOG image calculation, and then the fusion sub-map was calculated. Finally, a fusion image with obvious targets and good details was obtained, and the requirement for image registration was reduced. Five commonly used evaluation indicators, as well as the signal-to-clutter ratio and background similarity, were used to

收稿日期: 2020-03-23; 修订日期: 2020-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61675099)

作者简介: 曾瀚林(1995-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理方面的研究。Email: hanlinjkz@foxmail.com

导师简介: 钱惟贤(1980-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事目标检测方面的研究。Email: developer_plus@163.com

evaluate the fusion image. Experimental results show that the proposed algorithm is superior to the commonly used image fusion methods in both subjective vision and objective evaluation indicators.

Key words: imaging fusion; target detection; DOG filter; signal-to-clutter ratio

0 引言

长期以来,人们所观测的场景多为单一波段的可见光场景,但随着科学技术的不断发展,人们对图像要求逐步提升,单一波段图像已经不能满足观测要求。多波段的异源图像融合之后能够将多种异源图像的特点进行综合,方便观察者从一幅图像中观察到源自多张图像的信息。目前,图像融合技术已经广泛应用于军事、安防、医用等领域,在目标探测,危险物品检验,组织器官检查等方面展现了重要的作用^[1-3]。

自图像融合技术提出以来,已经涌现出各种各样的图像融合方法。总体来说,按照融合过程中信息处理的复杂程度可分为基于像素层面、特征层面和决策层面的融合;按融合过程中的空间域范围可分为基于空域的算法和基于变换域的算法,而常见的基于变换域的图像融合算法有基于离散余弦变换(DCT)、快速傅里叶变换(FFT)以及多尺度变换的算法等^[4]。

为了达到更好的融合质量,需要更好地满足两个要求:一是准确提取出输入源图像中的有效信息;二是合理地将异源信息整合到最终的融合图像中^[5]。在现有的各类红外与可见光图像融合算法中,基本的策略是将关注的红外目标融合进可见光图像,但是如何准确有效地提取出红外目标以及尽可能多的保留可见光图像中的细节成为了处理难题。在提取图像目标的研究方面诸多学者也提出了众多有效的方法^[6-8],也有部分算法引入了视觉显著性理论^[9-11],充分利用人眼的视觉特性来指导图像的融合,这是一种有效的方法,但仍旧很难避免目标区域提取不够精准,融合图像细节丢失的问题,另外在融合过程中,通常对图像配准的要求较高。基于红外目标特征提取的图像融合方法^[5]提取了红外目标,融合时在一定程度上保护了可见光图像细节,但是在可见光图像的暗部细节处,融合进部分红外亮背景使

得图像不自然。

针对上述问题,文中提出了一种基于高斯差分(DOG)滤波器的图像融合方法,将目标检测引入图像融合,在尽可能保留可见光图像细节的同时,融合进红外图像的有效信息,得到较好的融合效果。以红外和可见光图像的融合为例,按序分析图像及目标特性,基于DOG的红外目标提取方法,改进的图像融合算法,并对图像融合质量进行分析评价。

1 图像及目标特性

1.1 图像特性

人眼可观察到的可见光光谱范围为380~780 nm,且观察到的图像是光源照射到物体表面,经过反射后再经人眼成像,最后经大脑处理所形成的。可见光图像具体特性:图像信息丰富,分辨率、对比度较高,物体的轮廓外形清晰完整;成像质量受环境因素影响较大,当天气不佳或有物体遮挡时,成像质量大幅降低;图像受光照影响无法24 h获得。

红外成像器件通过接收物体发出的红外辐射信号转换成红外图像信号,物体的温度越高,红外图像中对应像素灰度值越大。红外成像因采用温差成像的原理,当背景与红外目标温度差异足够大时,才能获得对比度较高的图像。综合来说,红外图像拥有以下特性:图像受成像环境影响较小,能全天候获得;成像距离远,能探测远距离目标;受器件性能、各种噪声以及大气传输衰减的影响,图像信噪比、对比度较低。

1.2 红外目标特性

文中所指的红外目标泛指在红外图像中相对于背景较亮的点和面,对红外暗目标暂不做考虑。红外点面目标有着不同的辐射特性,反映到红外图像灰度值中也有对应的差异^[12]。在一幅红外图像中,红外目标总是呈现出较高的灰度值,而红外背景通常灰度值较低,且呈现出连续、相邻背景像素灰度值起伏不大的特点。因此,在一幅红外图像中若存在着红外目标,红外目标与背景之间往往对比度较大。故可以

通过对比度的大小判断一片区域内是否存在目标。

对于占据像素个数较少的红外小目标来说,所在像素与周围邻域的灰度值相差较大。而对于尺寸较大一些的红外目标,目标像素在红外图像中灰度值较高,且一般占据一片连续的区域,目标有着较为明显的轮廓,且轮廓和外部背景的灰度值差与轮廓和内部灰度值差相比,前者会明显大很多。

2 基于DOG 的红外目标提取

基于红外目标特性,可选取二维高斯差分滤波器来对目标进行提取。二维高斯差分滤波器是由二维高斯函数演变而来,二维高斯函数表达式如下:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别表示二维平面的横、纵坐标; σ 为二维高斯函数的方差,决定了二维高斯函数的空间分布。二维高斯函数在空间分布上呈现圆形对称的单峰值形状, σ 越小,二维高斯函数在空间分布上越尖锐,变化越剧烈,其扩散面积越小;反之, σ 越大,二维高斯函数在空间分布上越平滑,变化越缓慢,其扩散面积越大。对图像用较大的高斯滤波器进行滤波,相当于对图像做了平滑处理^[13-14]。

若将两个不同的 σ 参数代入公式,并进行做差,则得到如下表达式:

$$DOG(x, y, \sigma_1, \sigma_2) = DOG(x, y, \sigma_1) - DOG(x, y, \sigma_2) \quad (2)$$

即

$$DOG(x, y, \sigma_1, \sigma_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (3)$$

式中: σ_1, σ_2 分别表示两个不同的二维高斯函数方差,且 $\sigma_1 < \sigma_2$ 。通常为了更好地抑制高亮度背景区域,两个二维高斯函数需进行归一化处理。当 DOG 滤波器的中心区域捕捉到小目标,而四周区域都是目标周围的邻域背景时,滤波结果值比较大;而在背景部分,DOG 滤波器中心与四周都是起伏不大的背景,无论背景整体灰度值大小与否,滤波结果值将接近于 0,从而实现了图像背景区域的抑制。

如图 1 所示,当对图 1(a) 红外图像用窗口为 7, $\sigma_1 =$

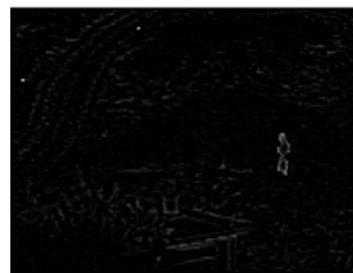
0.3, $\sigma_2 = 200$ 的 DOG 滤波器处理后,得到图 1(b) 所示结果。从滤波结果可以看出,红外图像经 DOG 滤波后消除了复杂背景,几个亮点变得非常明显。但对于红外图像中较大的人物目标,经过该参数的 DOG 滤波之后仅仅得到了人形的轮廓。究其原因是在人形区域中,轮廓上的像素相对于人形内的像素灰度对比度较低,但相对于人形外的背景灰度对比度较高,故经过 DOG 滤波之后仍能得到较大的值;而轮廓内的像素,则因非常类似于灰度起伏较小的背景,滤波之后值较小。

当 DOG 滤波器窗口更改为 19 后,得到图 1(c) 所示结果。此时面目标提取效果得到改善,人形目标则变得完整,且红外小目标仍然得到保留。



(a) 红外图像

(a) Infrared image



(b) DOG 图像(W=7)

(b) DOG image(W=7)



(c) DOG 图像(W=19)

(c) DOG image(W=19)

图 1 DOG 滤波效果图

Fig.1 DOG filtering effect diagram

3 基于DOG 的改进图像融合算法

从图1可以看出,DOG 滤波可以有效提取出图像中的点面目标,包括红外目标以及背景细节。以下将提出一种基于 DOG 算法的图像融合算法,算法流程如图 2 所示。

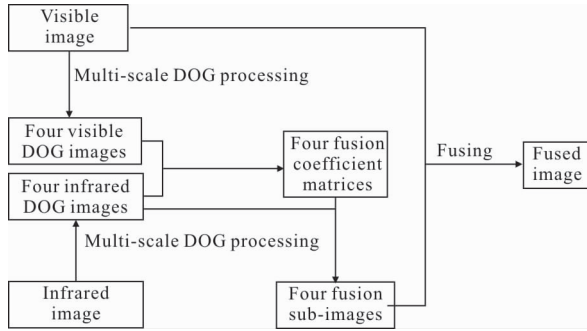


图 2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

第一步,分别提取出红外和可见光图像的各尺度 DOG 图像。

第二步,同尺度下的红外 DOG 图像与可见光 DOG 图像进行计算得到融合系数矩阵。

第三步,将同尺度的融合系数矩阵与红外 DOG 图像进行点乘运算得到对应尺度的融合子图。

第四步,将融合子图按一定规则与可见光图像进行融合,得到融合图像。

3.1 图像多尺度处理

处理示意图如图 3 所示。以 4 个参数为例, $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4$, 将图像分别做不同 σ 参数的高斯滤波处理,4 幅滤波图像与原始图像共计 5 层图像,相邻层两图进行做差处理可得到 DOG 1~DOG 4 共计 4 幅 DOG 图像。

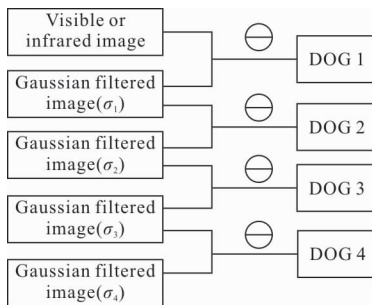


图 3 DOG 多尺度处理示意图

Fig.3 DOG multi-scale processing diagram

将红外图像和可见光图像分别做上述处理,可各自获得 4 幅 DOG 图像。如此便实现了多尺度处理。记 4 幅红外 DOG 图像为 $I_{d1} \sim I_{d4}$, 对应 4 个不同尺度。

3.2 融合系数矩阵函数

该融合算法的目的是尽可能保留可见光图像的细节,同时将红外图像中的目标、轮廓等有用信息融合到可见光图像中。因此,红外图像中越是明显、突出的疑似目标信息,对应的融合系数越大;观察者越是不关注的信息,对应的融合系数越小。

融合系数矩阵由同一尺度的红外 DOG 图像和可见光 DOG 图像计算而来,下文中红外 DOG 图像第 i 行第 j 列的像素灰度值用 $img1(i, j)$ 表示,可见光 DOG 图像第 i 行第 j 列的像素灰度值用 $img2(i, j)$ 表示,得到的融合系数用 $r(i, j)$ 表示,计算函数如下:

$$p(i, j) = |img1(i, j) - img2(i, j)| \quad (4)$$

$$f(i, j) = \begin{cases} p(i, j) & p(i, j) > 0 \\ 0 & p(i, j) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$r(i, j) = \begin{cases} a_1(i, j) & img1(i, j) > T_1 \\ a_2(i, j) & T_1 > img1(i, j) > 0 \\ 0 & img1(i, j) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $img1(i, j) > T_1$ 时,意味着 (i, j) 处像素处于较强的红外细节中。计算方法为先比较 $|img1(i, j)|$ 与 $|img2(i, j)|$ 的大小,当前者小时,可见光图像处于更强的细节中,本着尽可能保留可见光图像细节的初衷,红外图像在 (i, j) 处的融合分量应当被抑制,融合系数 $r(i, j) = 0$;当前者大时,意味着在 (i, j) 处红外图像处于更强的亮细节中,此时 (i, j) 处的融合系数大于 0,且两者差值越大,对应的融合系数越大,最后乘以系数 a_1 将 $r(i, j)$ 调整, a_1 取值范围为 $(0, 1)$,视 $img1(i, j) > T_1$ 情况下需要增强的程度而定。

当 $T_1 > img1(i, j) > 0$ 时,意味着 (i, j) 处像素处于较弱的红外细节中。方式与上一种情况相似,但由于此时红外细节较上一种情况较弱,乘以系数 a_2 对 $r(i, j)$ 进行调整, a_2 取值范围为 $(0, 1)$,且通常小于 a_1 ,视 $T_1 > img1(i, j) > 0$ 情况下需要增强的程度而定。

当 $img1(i, j) < 0$ 时,此时红外图像处于暗细节中。由于多数情况下观察者在意的是红外图像的亮细节,在该情况下将计算规则简化,对红外图像的暗部细节暂不考虑融合进可见光图像,该情况下对应的 $r(i, j) = 0$ 。

在 4 个尺度分别遍历每个像素即可得到 4 个尺度的系数矩阵。

3.3 图像融合

将得到的系数矩阵 r_n 分别与对应尺度的红外 DOG 图像 I_{dn} 做点乘运算,再乘以常数系数 b_n ,即可得到融合子图 I_n 。表达式为:

$$I_n(i, j) = r_n(i, j) \cdot I_{dn}(i, j) \cdot b_n \quad n=1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

最后将 4 幅融合子图与原始可见光图像 I_v 叠加即可得到融合图像 I_f 。N 为融合子图数量,则有:

$$I_f = I_v + \sum_{n=1}^N I_n \quad N=4 \quad (8)$$

按上式进行图像融合后即可得到最终的融合图像。

4 实验测试与分析

4.1 样本测试

用 Matlab 对算法进行测试,处理之后的结果如图 4 所示。

在融合图像中,可以非常直观地观察到红外图像中的红外目标,包括画幅左上角的两个点状目标以及较大的人物目标。另外,除了上述目标以及红外

图像中平台边缘较亮的部分被融合进融合图像外,红外图像其余部分基本都被很好地抑制,基本不会对融合图像的细节造成影响。

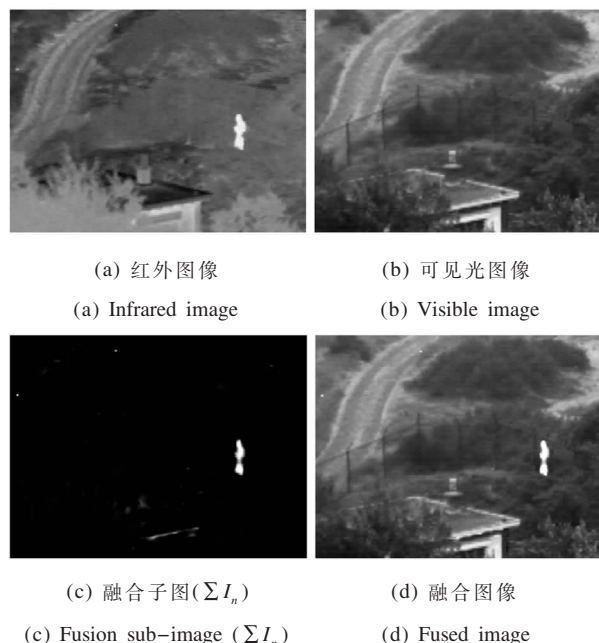


图 4 算法测试结果

Fig.4 Algorithm test result

融合过程的各阶段图像如图 5 所示。组图 Seq1~

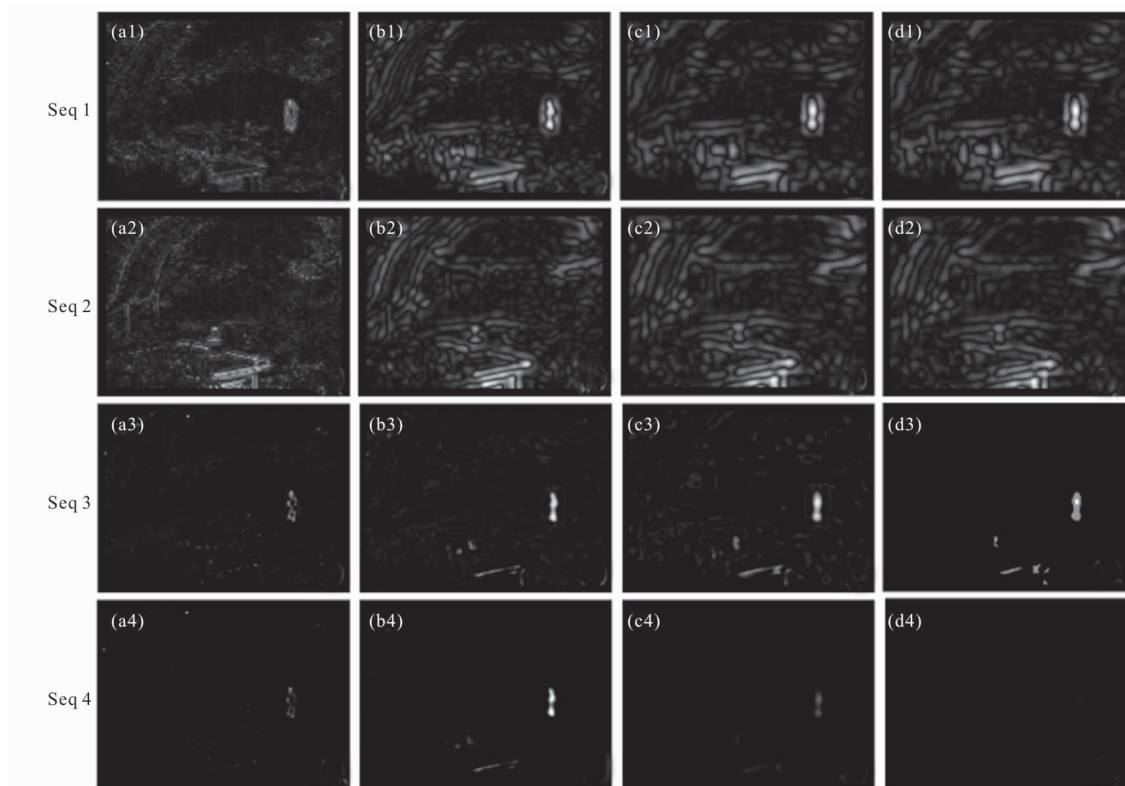


图 5 阶段处理图像

Fig.5 Image of each step

Seq 4 分别为:红外图像的多尺度 DOG 图像,可见光图像的多尺度 DOG 图像,多尺度融合系数矩阵图像,多尺度融合子图像。每一组的 4 幅图像代表 4 个不同尺度的结果。

多尺度 DOG 图像中可以观察到不同尺度下的图像细节。经过计算得到的融合系数矩阵转换成图

像后,可以直观呈现出红外图像中明显,而可见光图像中不具有的成分。融合子图反映了各个尺度融合进可见光图像的成分。

另外几组样本所得结果如图 6 所示。Seq 1~Seq 3 是 3 组图像,每一组的 4 幅图像为红外图像,可见光图像,总融合子图,融合图像。

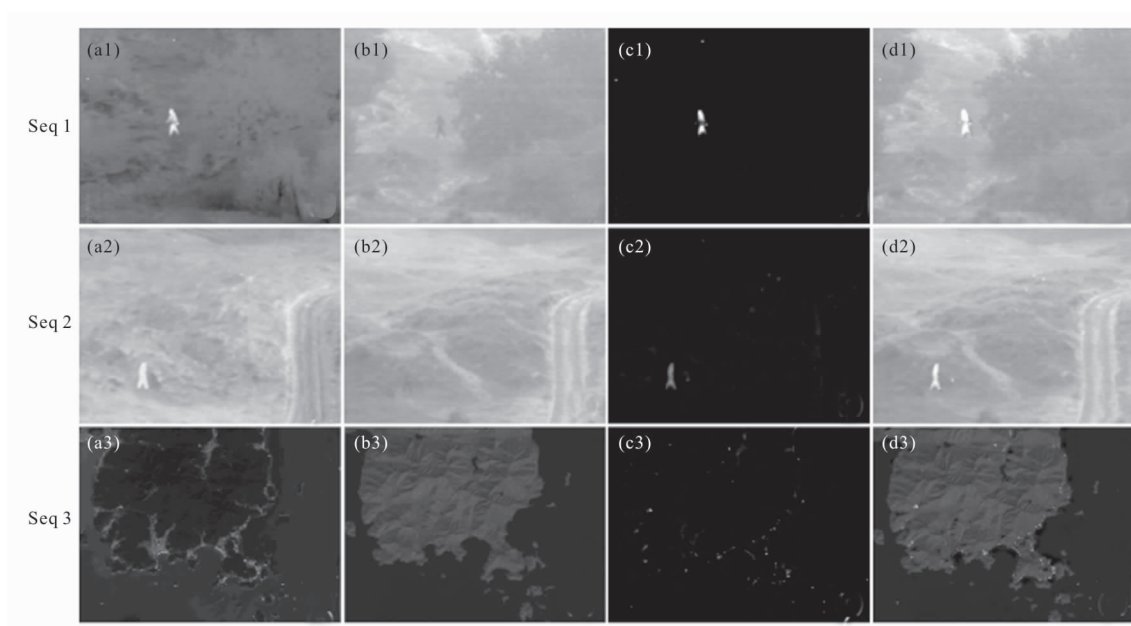


图 6 多组测试样本图像

Fig.6 Multiple sets of test images

第一组图像中,画幅左上角两个较小的点状目标与人物被很好地提取,叠加到可见光图像中,红外图像中的背景则被很好地抑制。最终的融合图像保留绝大部分的可见光图像细节,融合进了红外目标。还可以发现两幅原始图像并非完全配准,图中的人物位置有些许差异,融合图像中仅人物部分会有一小部分的重影,影响较小。而传统的融合算法则很容易造成整幅图像重影模糊的现象。

第二组图像中两幅图的背景部分差异较大,融合图像还是较好地保持了可见光图像中的背景细节,将红外目标进行了很好地融合。

第三组图像是两幅不同光谱的遥感图像,对于该组第一幅图中的特征亮点也能融合进第二幅图中。

通过这几组测试样本可以主观感受到:该算法不仅可以提取并增强红外目标,还能在融合过程中最大限度地保留可见光图像的细节,在融合图像中既能方便地同时观察两幅图像的有用信息,又能避

免信息冗余给观察者带来负担。另一方面,多光谱图像的测试样本也展示了该算法对多光谱图像融合也能起到较好的效果。传统算法要求源图像高度配准,否则融合图像会显得非常杂乱。而该算法即使图像配准度不高,对整个融合图像的影响也不会太大,降低了图像配准的要求。

4.2 结果对比与分析

对同一组图像分别采用加权平均算法(以下简称 WA 算法)、拉普拉斯金字塔法(LP)、基于非下采样轮廓波变换的算法(NSCT)、基于视觉显著性和引导滤波的算法^[10](VSG)、基于视觉显著性和 NSCT 的算法^[11](VSNSCT)与文中算法进行融合,结果如图 7 所示。

除主观评价外,还需要对融合图像进行客观评价。图像质量评价的方法有许多^[15-16]。首先分别采用图像的标准差(SD)、平均梯度(AG)、空间频率(SF)、信息熵(IE)、互信息量(MI)来评价图像的整体效果。

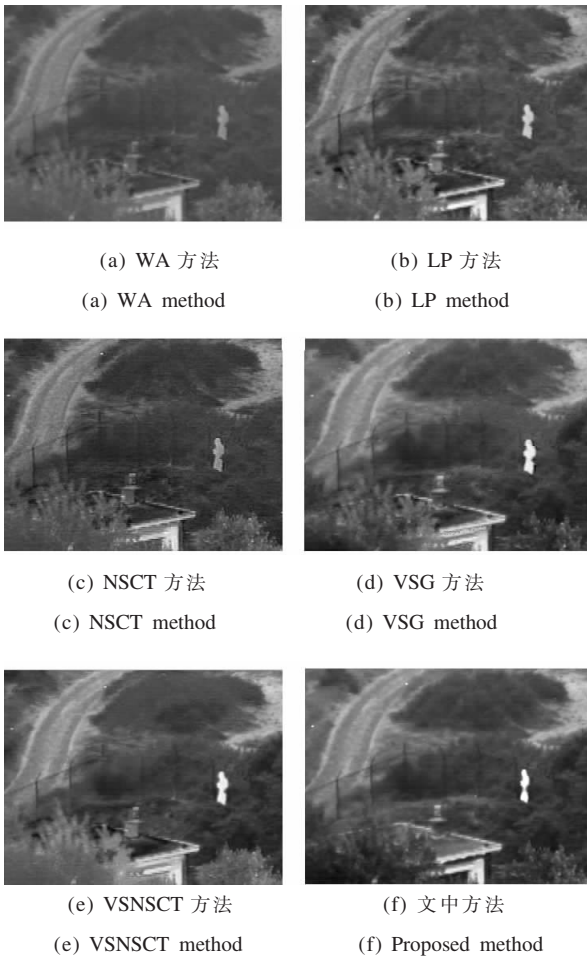


图 7 多种算法结果对比

Fig.7 Comparison of multiple algorithm results

选取每组样本的 6 种算法的融合图像, 对各项指标进行计算, 然后每项指标均除以所有算法该项指标的最高分, 得到归一化分数, 最后把每项指标的 4 组归一化分数取平均值。得分越高则表明效果越好, 统计结果如图 8 所示。

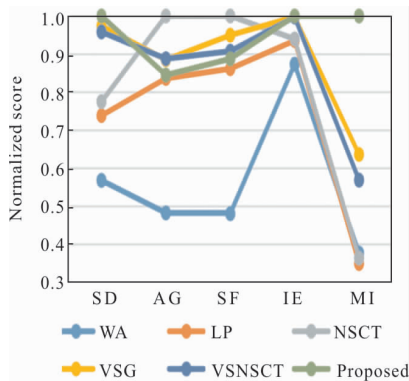


图 8 5 项评价指标折线统计图

Fig.8 Broken line statistical chart of five evaluation index

由折线统计图可知, 文中算法在 SD、IE 和 MI 评价指标上优于其他几类算法, 在 AG 和 SF 评价指标上与两种基于显著性的方法基本持平, 略逊色于 NSCT 融合算法。总的来说, 文中算法在整体的图像质量上占有一定优势。

为了便于定量分析文中算法侧重的对红外目标增强以及图像背景细节保护的效果, 分别采用信杂比 (Signal-to-Clutter Ratio, SCR) 与背景相似度 (Background Similarity, BS) 来评估。

信杂比计算表达式如下:

$$SCR = (f_T - f_c) / \sigma_c \quad (9)$$

式中: f_T 为目标的平均灰度值; f_c 、 σ_c 分别为目标邻域内背景的平均灰度值以及标准差。SCR 值越大, 信杂比越高, 目标越明显。

背景相似度指融合图像与某张源图像相同背景区域之间的相似程度, 反映了算法对源图像的背景区域保护效果的好坏, 背景相似度表达式如下:

$$BS = 1 - \frac{k \cdot \sum [I_1(i, j) - I_2(i, j)]^2}{S \cdot L^2} \quad (10)$$

式中: $I_1(i, j)$ 、 $I_2(i, j)$ 分别为两幅图像在 (i, j) 处像素灰度值; S 为选取背景区域总像素数; L 为图像的灰度范围跨度; k 为常数。BS 值在 0~1 之间, 越大表明背景相似度越高。

选取 4 组目标样本, 4 组背景样本, 分别比较 6 种算法的两个指标。

选取 4 组存在红外目标的区域, 计算 SCR 参数。其中前两组来自图 4, 后两组取自其他样本, 各算法融合图像的 SCR 参数如表 1 所示。

表 1 信杂比参数对比
Tab.1 SCR parameter comparison

Method	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
WA	5.193 7	2.988 2	6.571 3	2.543 4
LP	7.389 9	4.770 4	7.630 2	2.743 4
NSCT	8.167 8	4.195 8	7.972 9	2.360 9
VSG	7.994 9	3.449 0	9.321 4	2.839 1
VSNST	7.853 9	3.189 4	7.521 8	2.641 8
Proposed	11.227 1	6.450 9	11.967 6	5.189 3

选取 4 组背景区域,计算 BS 参数。其中前两组来自图 4,后两组取自其他样本,各算法融合图像的 BS 参数如表 2 所示。

表 2 背景相似度参数对比
Tab.2 BS parameter comparison

Method	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
WA	0.859 9	0.852 0	0.765 6	0.851 4
LP	0.870 0	0.817 4	0.804 0	0.814 4
NSCT	0.873 3	0.865 5	0.554 6	0.896 9
VSG	0.942 2	0.912 2	0.993 8	0.571 8
VSNSCT	0.980 8	0.704 2	0.914 1	0.462 3
Proposed	0.999 9	0.999 6	0.999 9	0.995 6

在信杂比方面,文中算法相较于其他算法有比较明显的优势,提升明显;在背景相似度方面,基于显著性的两种方法会将容易引起人眼注意的背景融合进可见光图像,容易造成图像细节丢失,而文中算法背景相似度接近于 1,说明绝大多数可见光图像的细节被保留了下来,相比其他方法优势明显。

5 结 论

作为图像处理的重要组成部分,学者们已经提出了众多的图像融合方法。传统的图像融合算法存在容易丢失细节、目标等有效信息提取程度不够精准的问题,使得融合图像整体呈现出细节模糊、信息冗余的欠佳效果,导致某些特征的识别难度增加。为了改善这些问题,文中提出了一种基于 DOG 滤波器的图像融合方法,将目标检测引入到图像融合中,用 DOG 滤波器分层准确提取出红外图像中的红外目标,将提取成分中可见光图像不具有的部分进行增强,提高了红外目标的信杂比;对可见光图像的背景部分进行保护,避免融合图像背景细节丢失,取得了较好的融合效果,且根据算法原理降低了对原始图像配准度的要求。通过实验表明,相较于其他 5 种算法,文中算法在 5 项客观整体图像指标上表现总体较好,在信杂比和背景相似度两项指标上都有较大的提升。

参考文献:

[1] Wang Guanglong, Tian Jie, Zhu Wenjie, et al. Feature fusion

and weight adaptive updating based motion blur object tracking [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1158-1166. (in Chinese)

王广龙,田杰,朱文杰,等.特征融合和自适应权重更新相结合的运动模糊目标跟踪[J].*光学精密工程*, 2019, 27(5): 1158-1166.

[2] Wang Sheng. Dangerous objects detection in millimeter wave images[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)

王胜.毫米波图像中危险物品检测 [D].北京:清华大学, 2018.

[3] Li Dezhi, Chen Hongda, Bi Feng, et al. Progress of multimodal molecular imaging technology in tumor diagnosis [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2016, 44(10): 1609-1618. (in Chinese)

李德智,陈宏达,毕锋,等.多模态分子影像技术在肿瘤诊断中的进展[J].*分析化学*, 2016, 44(10): 1609-1618.

[4] Shi Minhong. Summary of the development of image fusion technology[J]. *Computer Era*, 2019(9): 27-29. (in Chinese)

史敏红.图像融合技术发展综述[J].*计算机时代*, 2019(9): 27-29.

[5] Rong Chuanzhen, Jia Yongxing, Yang Yu, et al. Image fusion based on infrared object extraction [J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(7): 1141-1151. (in Chinese)

荣传振,贾永兴,杨宇,等.基于红外目标特征提取的图像融合方法[J].*信号处理*, 2019, 35(7): 1141-1151.

[6] Nan Tianzhang, Geng Jianjun, Chen Xu, et al. Infrared low, slow and small target detection based on neighborhood characteristics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S128002. (in Chinese)

南天章,耿建君,陈旭,等.基于邻域特征的红外低慢小目标检测[J].*红外与激光工程*, 2019, 48(S1): S128002.

[7] Wu Yanfeng, Wang Yanjie, Sun Haijiang, et al. LSS-target detection in complex sky backgrounds [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 854-866. (in Chinese)

吴言枫,王延杰,孙海江,等.复杂动背景下的“低小慢”目标检测技术[J].*中国光学*, 2019, 12(4): 854-866.

[8] Lu Fuxing, Chen Xin, Chen Guilin, et al. Dim and small target detection based on background adaptive multi-feature fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0326002. (in Chinese)

陆福星,陈忻,陈桂林,等.背景自适应的多特征融合的弱小目标检测[J].*红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0326002.

- saliency [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2776–2784. (in Chinese)
- 逯睿琦, 马惠敏. 多尺度显著性区域提取的模板匹配[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2776–2784.
- [10] Chen Lerui, Pan Qiuping, Kong Jinsheng. Research on image fusion based on saliency and guided filter [J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29(5): 110–111. (in Chinese)
- 陈乐瑞, 潘秋萍, 孔金生. 基于显著性和导向滤波的图像融合算法研究[J]. *工业控制计算机*, 2016, 29(5): 110–111.
- [11] Fu Zhizhong, Wang Xue, Li Xiaofeng, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency and NSCT[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2017, 46(2): 357–362. (in Chinese)
- 傅志中, 王雪, 李晓峰, 等. 基于视觉显著性和 NSCT 的红外与可见光图像融合[J]. *电子科技大学学报*, 2017, 46(2): 357–362.
- [12] Qiao Tieying, Cai Lihua, Li Ning, et al. Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 804–811. (in Chinese)
- 乔铁英, 蔡立华, 李宁, 等. 基于红外辐射特性系统实现对面目标测量[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 804–811.
- [13] Cao Lin, Lu Hongying, Cheng Lin. Application of improved DOG operator in image edge extraction [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2018, 14(6): 139–142. (in Chinese)
- 曹麟, 鲁红英, 程琳. 基于改进的 DOG 算子在图像边缘提取中的应用研究[J]. *电脑知识与技术*, 2018, 14(6): 139–142.
- [14] Birch P, Mitra B, Bangalore N M, et al. Approximate bandpass and frequency response models of the difference of Gaussian filter [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 4942–4948.
- [15] Xia Mingge, Ouyang Wen. Pixel level image fusion methods and fusion performance evaluation [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002(4): 224–229. (in Chinese)
- 夏明革, 欧阳文. 像素级图像融合方法与融合效果评价[J]. *遥感技术与应用*, 2002(4): 224–229.
- [16] Yu Xianchuan, Pei Wenjing. Performance evaluation of image fusion quality metrics for the quality of different fusion methods[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3416–3422. (in Chinese)
- 余先川, 裴文静. 针对不同融合算法的质量评价指标性能评估[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3416–3422.