

改进结构相似度的红外两波段图像目标配准*

闻新, 谢天夏, 闫钧华, 张寅, 黄伟

(南京航空航天大学航天学院 南京 210016)

摘要:针对红外两波段图像目标配准问题,研究了目标整体结构特征,在高斯尺度空间对结构相似度、多尺度结构相似度和边缘结构相似度进行改进,提出基于改进的多尺度边缘结构相似度算法的红外两波段图像目标配准算法。利用高斯尺度空间中不同尺度的图像及其边缘图像计算多尺度结构相似度,结合了红外图像中保留的目标完整的边缘结构信息,提高了目标配准效果。实验结果表明基于改进的多尺度边缘结构相似度算法的红外两波段图像目标配准算法的目标配准正确率和目标配准精度都优于其他算法,目标相似度值高于0.98。

关键词:目标配准;红外两波段图像;多尺度结构相似;边缘

中图分类号: TP391.4 TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Target registration for two wave band infrared images based on improved structural similarity

Wen Xin, Xie Tianxia, Yan Junhua, Zhang Yin, Huang Wei

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to register targets between two wave band infrared images, the overall structure feature is studied in this paper. A novel target registration algorithm for two wave band infrared images based on improved multi-scale edge structural similarity is proposed by means of improving structural similarity algorithm, multi-scale structural similarity algorithm and edge structural similarity algorithm in Gauss scale space. Improved multi-scale edge structural similarity is calculated through using images of different scales and their edge images in Gauss scale space. Then the performance of target registration can be improved due to that target's complete edge structure information in the infrared images is utilized fully. The experimental results show that the accuracy of target registration based on the proposed method is better than other algorithms, and the target similarity between two wave band infrared images is higher than 0.98.

Keywords: target registration; two wave band infrared images; multi-scale structural similarity; edge

0 引言

侦查监控系统迫切需求能够全天候将地面目标从复杂背景中识别出来。人、轿车等典型地面目标的热辐射波长大多集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外波段和 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 的远红外波段内;在不同的大气环境下,中红外波段和远红外波段辐射的透射率不同。为了更高质量地全天候识别目标,充分利用目标红外两波段图像的互补信息成为必要,因此配准红外两波段图像成为地面目标识别的关键技术。

谭东杰等人^[1]采用方向相关和互信息法实现红外两波段图像配准,该方法精度高,但是计算量大、效率低;李伟等人^[2]采用互信息作为适应度函数,改进遗传算法作为搜索策略,在保证图像配准准确性的同时大大加快了配准速度,但当红外两波段图像灰度差异很大时,这种基于灰度信息的图像配准算法效果很差;韩超等人^[3]采用稀疏降维原理降低Trajkovic特征点描述符的维数,该方法同样加快了图像配准速度,但是Trajkovic特征点的提取仍然很耗时。由于中红外热像仪和远红外热像仪的成像波段和成像机理不同,会导致远红外图像、中红外图像

虽然灰度的取值区间是一样的,但是在这两种图像上,同一个灰度值所代表的含义是不一样的,具有很大的差异,仅采用灰度信息的红外两波段图像配准算法的鲁棒性差。基于结构特征的红外两波段图像配准算法成为发展的新趋势。陈木生^[4]采用特征点周围区域双向结构相似度最大准则来获得精确的特征点匹配对,使得大角度旋转图像获得了较好的配准效果,但单尺度的结构相似度不能应对较大尺度变化图像的准确配准;Wu L. F. 等人^[5]和 Qi W 等人^[6]均通过计算粗配仿射性尺度不变特征变换 (affine scale-invariant feature transform, ASIFT) 特征点对周围区域的结构相似度来剔除错误的匹配点对,ASIFT 特征点对尺度、旋转和仿射变换具有较好的鲁棒性,但是单尺度的结构相似度在图像尺度变化较大时对误匹配点对的剔除效果不佳;Wirth M 等人^[7]、刘锦帆等人^[8]和 Charrier C 等人^[9]提出了基于高斯金字塔的多尺度结构相似度算法,该算法提升了结构相似度对图像尺度的鲁棒性,但是高斯金字塔缺乏理论基础,无法分析图像中目标的尺度,且高斯金字塔图像中每层尺度图像都要减小分辨率。以上算法均未用到图像的边缘信息,边缘信息更具结构性,对图像结构相似度的计算有促进作用^[10]。孙彦景等人^[11]和 Wang Z 等人^[12]计算多尺度结构相似度时结合了图像的边缘信息,充分利用了图像保留完整的边缘结构信息,减小了图像灰度差异对结构相似度的影响,但这种算法并没有对原图像进行尺度变化且只实现了结构相似度分量的多尺度计算,没有实现结构相似度中其余两个分量的多尺度计算。

红外图像普遍存在纹理信息少、整体灰度小、分辨率低和对比度小等缺点,但很好地保留了目标的边缘信息,结构信息完整。当成像设备与目标的距离发生改变时,目标图像的尺度会随之改变;远红外相机和中红外相机各自物镜的焦距和物距存在差异,导致了目标的远红外图像和中红外图像之间存在明显的尺度不同。因此本文提出了改进的基于高斯尺度空间的多尺度边缘结构相似度目标配准算法,实现红外两波段图像目标配准。

1 结构相似度算法

Zhou W 等人在 2002 年首次提出结构相似度。它能够直接估计图像之间的结构变化,衡量两幅图像的相似度。

1.1 结构相似度

结构相似度^[8] (structural similarity, SSIM) 由 3 个部分构成,分别是亮度相似度分量,对比度相似度分量和结构相似度分量。目标的远红外图像和中红外图像分别用 F 、 M 表示, F 、 M 之间的亮度相似度、对比度相似度和结构相似度分别用 $l(F, M)$ 、 $c(F, M)$ 和 $s(F, M)$ 表示,则 F 、

M 之间的 SSIM 为:

$$SSIM(F, M) = [l(F, M)]^\alpha \cdot [c(F, M)]^\beta \cdot [s(F, M)]^\gamma \quad 0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1 \quad (1)$$

式中: $l(F, M) = \frac{2\mu_F\mu_M + c_1}{\mu_F^2 + \mu_M^2 + c_1}$, μ_F 、 μ_M 表示图像 F 、 M 的平均灰度值; $c(F, M) = \frac{2\sigma_F\sigma_M + c_2}{\sigma_F^2 + \sigma_M^2 + c_2}$, σ_F 、 σ_M 表示图像 F 、 M 的标准偏差; $s(F, M) = \frac{\sigma_{FM} + c_3}{\sigma_F\sigma_M + c_3}$, σ_{FM} 表示图像 F 、 M 的协方差。

其中,常量 c_1 、 c_2 、 c_3 的引入是为了避免分母趋近于零带来的不稳定性,且 $c_i = (K_i L)^2$, $i = 1, 2, 3$, L 为图像灰度的变化范围,本文中该值为 256, $K_i \ll 1$ 。本文为了简化表达式,将 c_1 、 c_2 、 c_3 的值均取为 0.01。

1.2 多尺度结构相似度

多尺度结构相似度 (multi-scale structural similarity, MS-SSIM)^[11], 可以使 SSIM 度量不同尺度图像间的相似度。 F 、 M 之间的 MS-SSIM 为:

$$MS-SSIM(F, M) = \left[\prod_{i=1}^N [l(F, M)]^{\omega_i} \right]^\alpha \cdot \left[\prod_{i=1}^N [c(F, M)]^{\omega_i} \right]^\beta \cdot \left[\prod_{i=1}^N [s(F, M)]^{\omega_i} \right]^\gamma \quad 0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1 \quad (2)$$

式中: N 为尺度的个数,考虑图像的视觉距离和失真尺度^[11], 本文 $N = 5$, ω_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 的取值分别为 0.044 8、0.285 6、0.300 1、0.232 6、0.133 3。

1.3 边缘结构相似度

背景和目标的红外辐射存在差异,因而红外图像中的背景和目標间保留了清晰完整的边缘信息^[13-14], 在表达图像结构信息方面,边缘结构相似度 (edge structural similarity, ESSIM)^[15] 更具有鲁棒性。ESSIM 在计算结构相似度分量时,利用的图像为目标的远红外图像和中红外图像 F 、 M 对应的边缘图像。 F 、 M 之间的 ESSIM 为:

$$ESSIM(F, M) = [l(F, M)]^\alpha \cdot [c(F, M)]^\beta \cdot [s_e(F, M)]^\gamma \quad 0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1 \quad (3)$$

式中: $s_e(F, M) = \frac{\theta_{FM} + c_4}{\theta_F\theta_M + c_4}$, θ_F 、 θ_M 分别表示图像 F 、 M 对应的边缘图像的标准偏差, θ_{FM} 表示图像 F 、 M 对应的边缘图像的灰度协方差。与 SSIM 算法一致, c_4 取值为 0.01, 避免除数为 0。

2 改进的多尺度边缘结构相似度算法

为了减小尺度变换对结构相似度的影响,本文利用高斯尺度空间,研究出改进的基于高斯尺度空间的多尺

度结构相似度 (multi-scale edge structural similarity based on Gauss scale space, MS-ESSIMG)。为了增强边缘结构相似度对尺度变化的鲁棒性,本文基于 MS-SSIM 和 ESSIM,计算结构相似度时利用目标红外图像的边缘图像,得到改进的基于高斯尺度空间的多尺度边缘结构相似度 MS-ESSIMG 算法。

2.1 高斯尺度空间

Young R. A.^[16]证明了高斯尺度空间与人类认知之间存在着密切的联系。高斯尺度空间通过对图像采用不同的高斯核平滑滤波得到^[17],且所有尺度上的图像具有相同的分辨率。

高斯尺度空间 $L(x, y, t)$ 由方差为 t 的高斯核 $G(x, y, t)$ 和原图像 $I(x, y)$ 卷积得到:

$$L(x, y, t) = \begin{cases} I(x, y) * G(x, y, t), & t > 0 \\ I(x, y), & t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$G(x, y, t) = \frac{1}{2\pi t} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2t}\right) \quad (5)$$

2.2 改进的基于高斯尺度空间的 MS-ESSIMG 算法

MS-ESSIMG 算法是在高斯尺度空间对 SSIM、MS-SSIM 和 ESSIM 进行改进得到。利用尺度空间中不同尺度的图像及其边缘图像,实现 3 个相似度 $l_{\text{MSG}}(F, M)$ 、 $c_{\text{MSG}}(F, M)$ 和 $s_{\text{MSG}}(F, M)$ 的计算。基于高斯尺度空间的 F, M 之间的多尺度边缘结构相似度 MS-ESSIMG 为:

$$MS-ESSIMG(F, M) = [l_{\text{MSG}}(F, M)]^\alpha \cdot [c_{\text{MSG}}(F, M)]^\beta \cdot [s_{\text{MSG}}(F, M)]^\gamma \quad 0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1 \quad (6)$$

式中: $l_{\text{MSG}}(F, M) = [l(F_N, M_N)]^{\omega_N}$, $c_{\text{MSG}}(F, M) = \prod_{i=1}^N [c(F_i, M_i)]^{\omega_i}$, $s_{\text{MSG}}(F, M) = \prod_{i=1}^N [s_e(F_i, M_i)]^{\omega_i}$ 。

其中, $F_i = F * G(x, y, t_i)$, $M_i = M * G(x, y, t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为尺度的个数。与 MS-SSIM 算法一致,这里 $N = 5$, ω_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 的取值分别为 0.044 8、0.285 6、0.300 1、0.232 6、0.133 3。

算法具体步骤如下:

1) 分别提取目标远红外图像 F , 目标中红外图像 M 的高斯尺度空间及其 Canny 边缘图像,在此基础上提取它们各自边缘图像的高斯尺度空间;

2) 根据式(1)在高斯尺度空间计算第 N 个尺度的亮度相似度和每个尺度的对比度相似度,根据式(3)在高斯尺度空间计算每个尺度的结构相似度;

3) 根据式(6)计算多尺度亮度相似度、多尺度对比度相似度和多尺度结构相似度,最终得到基于高斯尺度空间的多尺度边缘结构相似度。

3 基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法

算法基本步骤:首先从远红外图像和中红外图像中将目标提取出来,分别表示成 FO_i, MO_j ($i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$), N_1 表示远红外图像中目标的个数, N_2 表示中红外图像中目标的个数。然后对每个远红外图像中的目标 FO_i ($i = 1, 2, \dots, N_1$), 计算它与每个中红外图像中的目标 MO_j ($j = 1, 2, \dots, N_2$) 的结构相似度 MS-ESSIMG, 得到结构相似度值序列为 s_j ($j = 1, 2, \dots, N_2$)。最后比较 s_j ($j = 1, 2, \dots, N_2$) 的大小, 找到最大的结构相似度值为 s_k ($k \in 1, 2, \dots, N_2$)。于是 (FO_i, MO_k) 是目标正确的配准对。目标配准算法流程图如图 1 所示。

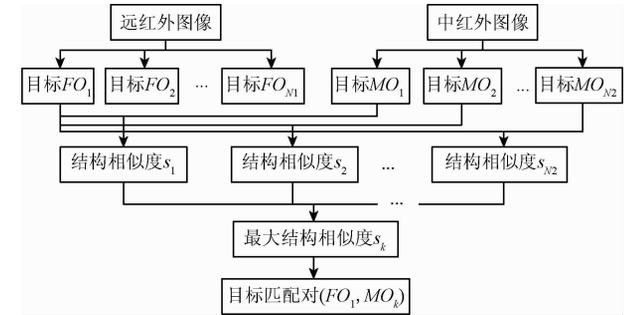


图 1 基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法流程

Fig. 1 Flow chart of target registration between two wave band infrared images based on MS-ESSIMG algorithm

4 实验结果与说明

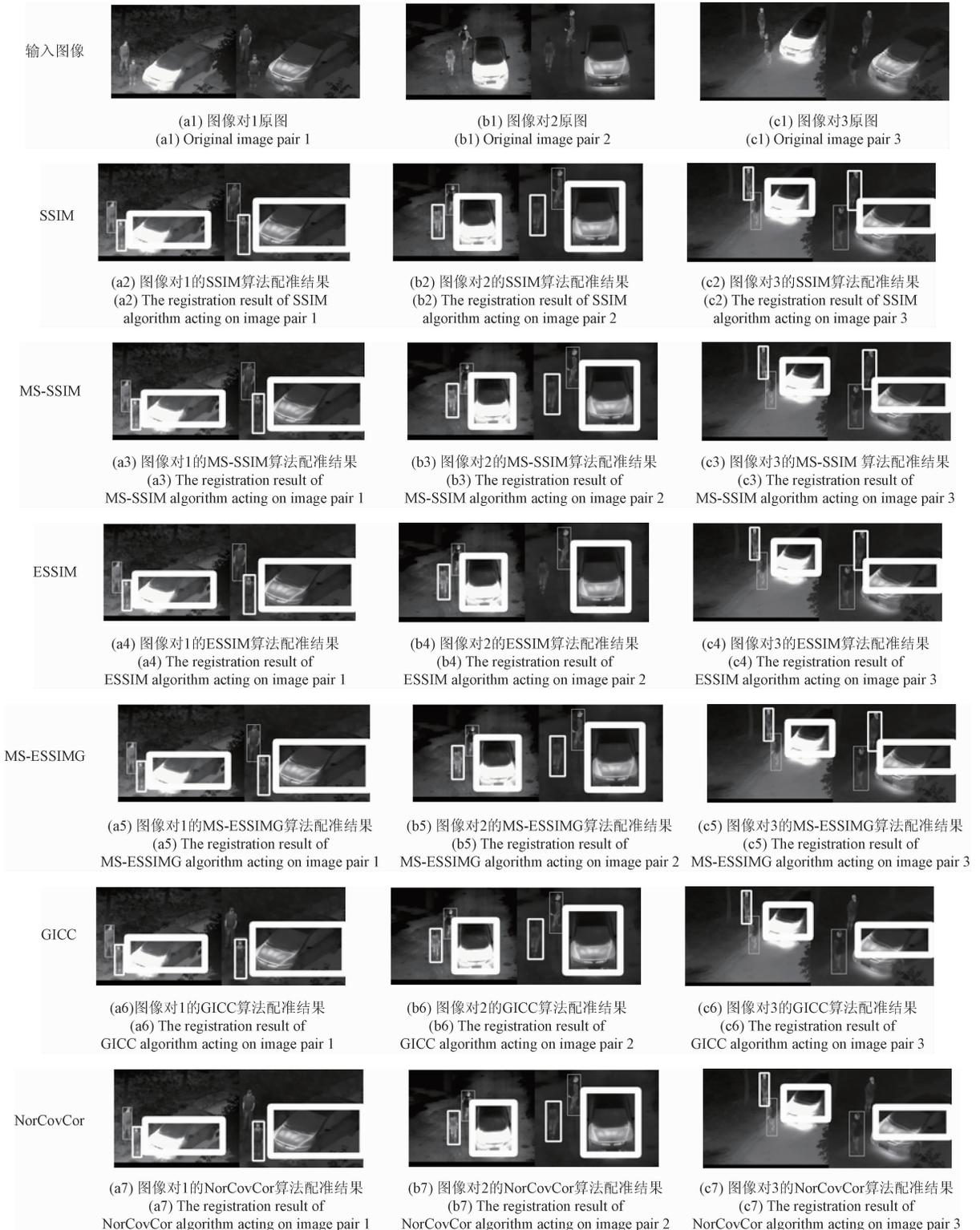
实验图像为实地拍摄所得。采用 IR518 单目镜手持式红外热像仪 (工作波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$) 拍摄远红外图像, 分辨率为 384×288 像素; 采用 IR300 中波制冷热像仪 (工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$) 拍摄中红外图像, 分辨率为 320×256 像素。将基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法与 6 种性能较好的配准算法在 6 对中红外图像和远红外图像上进行目标配准实验。这 6 种配准算法是: 基于 SSIM 的目标配准算法、基于 MS-SSIM 的目标配准算法、基于 ESSIM 的目标配准算法、基于梯度信息相关算法 GICC 的目标配准算法^[18]、基于归一化协方差相关系数算法 NorCovCor 的目标配准算法^[19]、基于归一化相关系数算法 NorCroCor 的目标配准算法^[20]。

所有实验都是在华硕 G11 飞行堡垒台式机计算机上进行, 该设备的处理器是 Intel Core i7-7700, 内存 8 G。操作系统为 Win7, 实验平台为 VS2010 + OpenCV2.4.6。

4.1 红外两波段图像目标配准实验

SSIM 算法、MS-SSIM 算法、ESSIM 算法、MS-ESSIMG 算法、GICC 算法、NorCovCor 算法、NorCroCor 算法在 6 对 中红外图像和远红外图像上的目标配准实验结果如图 2、3 所示。相同边缘粗细矩形框(最小边缘粗细框、中等边缘粗细框、最大边缘粗细框)内的目标表示同一个目

标,最小边缘粗细框内是目标 1、中等边缘粗细框内是目标 2、最大边缘粗细框内是目标 3。图 2、3 中每对图像的 左边为远红外图像,右边为中红外图像。远红外图像下 边沿处的黑色矩形区域,是为了使得图示在一起的中红 外、远红外图像高度相同而造成的,原始远红外图像中无 此黑色矩形区域,不影响实验结果。



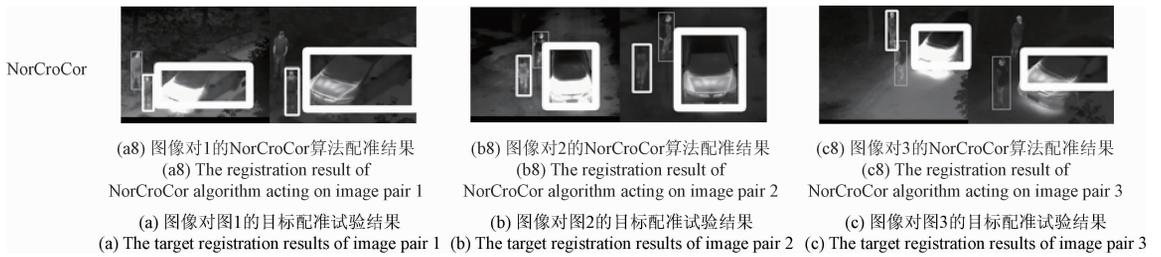
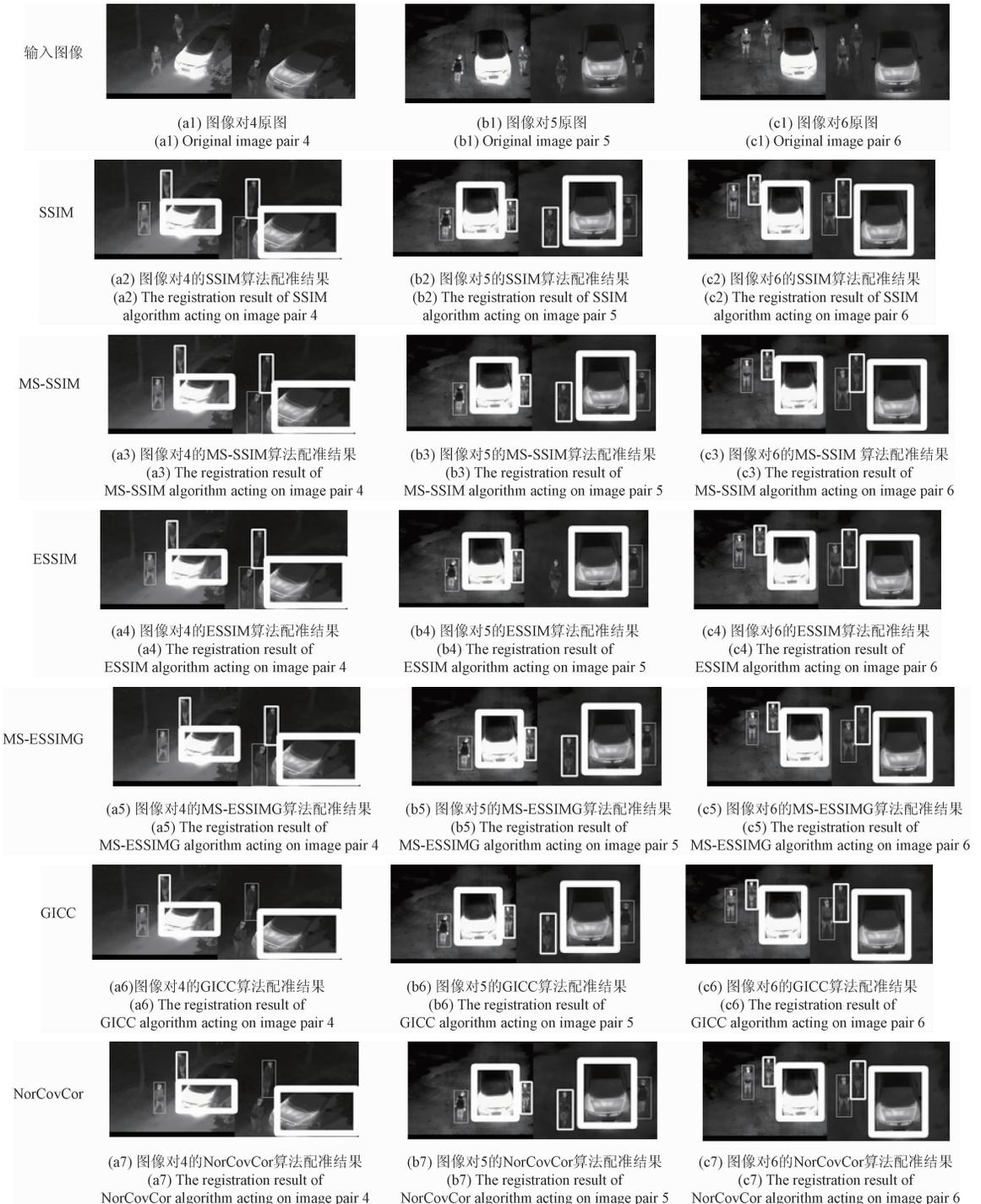


图2 7种配准算法在图像对1~3的目标配准实验效果

Fig. 2 The target registration results of seven algorithms acting on image pair 1 to 3



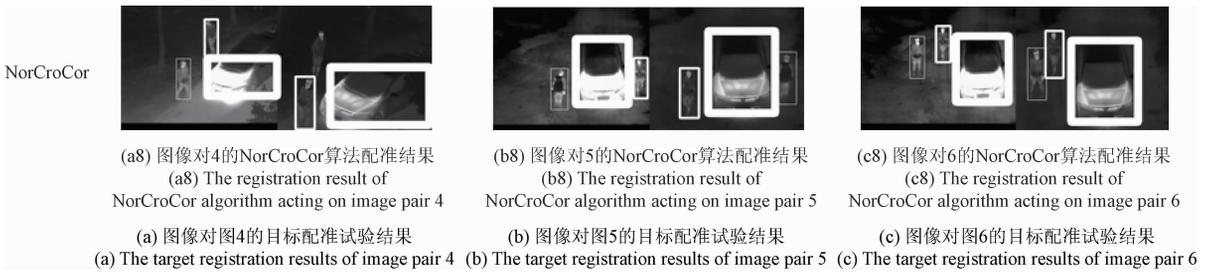


图 3 7 种配准算法在图像对 4~6 的目标配准实验效果

Fig. 3 The target registration results of seven algorithms acting on image pair 4 to 6

6 个图像对之间存在图像背景、目标姿态、拍摄角度等变化,图 2、3 的实验结果表明,SSIM 算法、MS-SSIM 算法、MS-ESSIMG 算法在 6 对中红外图像和远红外图像上都能把不同类别的目标准确配准,ESSIM 算法、GICC 算法、NorCovCor 算法和 NorCroCor 算法出现了目标配准错误的情况。ESSIM 算法出现了 2 次目标配准错误(图像对 2、5),GICC 算法出现了 3 次目标配准错误(图像对 1、3、4),NorCovCor 算法出现了 2 次目标配准错误(图像对 3、4),NorCroCor 算法出现了 3 次目标配准错误(图像对 1、3、4)。

目标配准正确率的定义为目标对配准正确个数与目标对总数的比值。在本实验中,总共有 6 对图像,每对图像有 3 个目标对,因此目标对总数为 18。目标配准正确率如表 1 所示。

表 1 表明,SSIM 算法、MS-SSIM 算法、MS-ESSIMG 算法的目标配准正确率达到了 100%,ESSIM 算法、GICC 算法、NorCovCor 算法和 NorCroCor 算法的目标配准正确率均低于 90%。这说明 SSIM 算法、MS-SSIM 算法、MS-ESSIMG 算法的目标配准性能优于 ESSIM 算法、GICC 算法、NorCovCor 算法和 NorCroCor 算法。

表 1 七种配准算法的目标配准正确率
Table 1 Accuracy of target registration for seven algorithms (%)

方法	目标配准正确率
SSIM	100
MS-SSIM	100
ESSIM	88.89
MS-ESSIMG	100
GICC	77.78
NorCovCor	77.78
NorCroCor	83.33

4.2 红外两波段图像目标配准精度比较

将本文提出的基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法与基于 SSIM 的目标配准算法、基于 MS-SSIM 的目标配准算法进行目标配准精度比较,评价指标为

目标相似度值,因为目标相似度值越高,目标配准精度越高。目标相似度值分别根据式(1)、(2)、(6)计算得到。

6 个图像对中正确配准的目标之间的相似度值如表 2 所示,表中用粗体显示了 3 种算法在每个目标配准对中的目标相似度最大值。每个图像对中远红外图像中的目标为 FO_1 、 FO_2 和 FO_3 ,中红外图像中的目标为 MO_1 、 MO_2 和 MO_3 、 FO_1 与 MO_1 、 FO_2 与 MO_2 、 FO_3 与 MO_3 是正确的目标配准对。

表 2 六个图像对中正确配准的目标之间的相似度
Table 2 Similarity of correctly registered targets for six image pairs

图像对目标对	SSIM	MS-SSIM	MS-ESSIMG
图像对 1	FO_1-MO_1	0.490 706	0.909 466
	FO_2-MO_2	0.661 231	0.946 353
	FO_3-MO_3	0.727 936	0.958 555
图像对 2	FO_1-MO_1	0.645 598	0.943 339
	FO_2-MO_2	0.723 151	0.957 713
	FO_3-MO_3	0.698 125	0.953 227
图像对 3	FO_1-MO_1	0.967 635	0.995 624
	FO_2-MO_2	0.958 893	0.994 420
	FO_3-MO_3	0.908 523	0.987 293
图像对 4	FO_1-MO_1	0.867 095	0.981 170
	FO_2-MO_2	0.939 637	0.991 735
	FO_3-MO_3	0.918 105	0.988 675
图像对 5	FO_1-MO_1	0.439 765	0.896 275
	FO_2-MO_2	0.348 573	0.868 936
	FO_3-MO_3	0.680 373	0.949 960
图像对 6	FO_1-MO_1	0.616 844	0.937 628
	FO_2-MO_2	0.657 672	0.945 672
	FO_3-MO_3	0.680 850	0.950 048

表 2 表明,MS-ESSIMG 算法的目标相似度值高于 SSIM 算法和 MS-SSIM 算法,这说明基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法的目标配准精度高于

基于 SSIM 的目标配准算法、基于 MS-SSIM 的目标配准算法。虽然在表 1 中 SSIM 算法和 MS-SSIM 算法的目标配准正确率达到了 100%，但是本次实验的样本数是 18，如果增加样本数，SSIM 算法和 MS-SSIM 算法的目标配准正确率就有可能低于 100%。

4.3 本文算法在地面目标识别中的应用

在红外两波段图像目标配准的基础上，本文实现可见光与红外两波段图像的目标识别算法 (target recognition algorithm of visible, mid infrared and far infrared images, TRA_VMF)，将其效果与融合可见光与远红外图像目标特征的目标识别算法的识别效果对比。这 5 种目标识别算法是基于小波不变矩与反向传播神经网络的目标识别算法 (target recognition algorithm based on wavelet in-

variant moments and back propagation neural network, TRA_WIMBPNN)^[21]、基于主成分分析与支持向量机的目标识别算法 (target recognition algorithm based on principal component analysis and support vector machine, TRA_PCASVM)^[22]、基于 Hu 不变矩与支持向量机的目标识别算法 (target recognition algorithm based on Hu invariant moments and support vector machine, TRA_HIMSVM)^[23]、基于形状特征与反向传播神经网络的目标识别算法 (target recognition algorithm based on shape feature and back propagation neural network, TRA_SFBPNN)^[24]、基于形状特征与支持向量机的目标识别算法 (target recognition algorithm based on shape feature and support vector machine, TRA_SFSVM)^[25]。目标识别率如表 3 所示。

表 3 六种目标识别算法的目标识别率

Table 3 Target recognition rates of 6 target recognition algorithms

算法	TRA_VMF	TRA_WIMBPNN	TRA_PCASVM	TRA_HIMSVM	TRA_SFBPNN	TRA_SFSVM
目标 1、2 姿态变化	旋转, 站蹲	旋转, 站蹲	旋转, 站蹲	旋转, 站蹲	旋转, 站蹲	旋转, 站蹲
目标 3、4 姿态变化	旋转	旋转	旋转	旋转	旋转	旋转
目标测试样本数	116	116	116	116	116	116
每类目标测试样本数	29	29	29	29	29	29
目标 1 识别率/%	79.310 3	0	48.275 9	58.620 7	27.586 2	79.310 3
目标 2 识别率/%	93.103 4	89.655 1	96.551 7	24.137 9	17.241 4	37.931 0
目标 3 识别率/%	93.103 4	6.896 6	13.793 1	89.655 2	27.586 2	37.931 0
目标 4 识别率/%	96.551 7	17.241 4	0	58.620 7	100.000 0	100.000 0
目标总识别率/%	90.517 2	28.448 3	39.655 1	57.758 6	43.103 4	63.793 1

注: 目标 1 代表男生, 目标 2 代表女生, 目标 3 代表摩托车, 目标 4 代表轿车

表 3 表明, TRA_VMF 算法中目标 1、目标 2 和目标 3 的识别率均高于其他 5 种目标识别算法的识别率; 目标 4 的识别率也达到了 96% 以上, 略低于 TRA_SFBPNN 算法和 TRA_SFSVM 算法的识别率; 目标总识别率比其他 5 种目标识别算法高 30% 以上。这说明融合可见光、中红外与远红外图像目标特征可大幅度提高目标识别率, 具有优越的目标识别性能, 证明了配准红外两波段图像目标有助于目标识别。尽管本文只测试了 4 类目标样本, 但是这 4 类目标样本非常具有代表性。本文在测试这 4 类目标样本时, 每一类目标存在多种姿态变化。因此若测试样本换为其他类型的具有多种姿态变化的目标, 本文算法仍然具有较高的目标识别率。

5 结 论

本文在高斯尺度空间对 SSIM、MS-SSIM 和 ESSIM 进行改进提出基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法。将其与 6 种性能较好的配准算法在 6 对中

红外图像和远红外图像上进行目标配准实验, 实验结果表明基于 MS-ESSIMG 算法的红外两波段图像目标配准算法的目标配准正确率和目标配准精度都优于其他算法。这说明引入高斯尺度空间和图像边缘信息的多尺度结构相似度算法可以提高目标配准效果。最后, 本文在该算法的基础上实现融合可见光与红外两波段图像目标特征的目标识别, 将其效果与融合可见光与远红外图像目标特征的目标识别效果对比, 证明了配准红外两波段图像目标有助于目标识别。配准 MS-ESSIMG 算法是通过盲搜索机制找到最相似的目标匹配对, 当图像中的目标数增加时, 算法会比较耗时, 该算法在处理分辨率分别为 352×288 、 320×240 的中红外图像和远红外图像时消耗的时间约为 1.3 s。今后将进一步研究先将目标粗分类, 然后在类中实现目标的精配准, 以降低算法耗时。

参考文献

- [1] 谭东杰, 张安. 方向相关与互信息加权组合多模图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 836-841.

- TAN D J, ZHANG AN. Multimodal image registration method based on weighting directional correlation and mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3):836-841.
- [2] 李伟, 杨绍清. 基于改进自适应遗传算法的图像配准方法[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9):991-994.
- LI W, YANG SH Q. Image registration method based on improved adaptive genetic algorithm[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(9):991-994.
- [3] 韩超, 方露, 章盛. 一种优化的图像配准算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(2):178-184.
- HAN CH, FANG L, ZHANG SH. An optimized image registration algorithm[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(2):178-184.
- [4] 陈木生. 基于区域特征的图像配准方法研究[J]. *红外技术*, 2010, 32(3):145-151.
- CHEN M SH. Research on image registration method based on region feature[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(3):145-151.
- [5] WU L F, ZHOU P, LIU SH Q, et al. A face authentication scheme based on affine-SIFT (ASIFT) and structural similarity (SSIM) [C]. 7th Chinese Conference (CCBR), 2012:25-32.
- [6] QI W, HOU Y X, WU L F, et al. A pose robust face recognition approach by combining PCA-ASIFT and SSIM [C]. 9th Chinese Conference (CCBR), 2014:163-172.
- [7] WIRTH M, BOBIER B. Registration of the Prokudin-Gorskii colour photographs using a multi-resolution SSIM algorithm [C]. International Conference on Image Analysis & Recognition (ICIAR), 2009:917-926.
- [8] 刘锦帆, 徐浩煜, 梁兴东, 等. 基于 HSV 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(11):19-26.
- LIU J F, XU H Y, LIANG X D, et al. Polarimetric SAR image quality evaluation method based on HSV structure similarity [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34(11):19-26.
- [9] CHARRIER C, KNOBLAUCH K, MALONEY L T, et al. Optimizing multi-scale SSIM for compression via MLDS [C]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012:4682-4694.
- [10] 王江明, 余焯, 金强, 等. 多梯度融合的 RGBD 图像边缘检测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(3):436-442.
- WANG J M, YU Y, JIN Q, et al. RGBD image edge detection based on multi-gradient fusion [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(3):436-442.
- [11] 孙彦景, 杨玉芬, 刘东林, 等. 基于内生成机制的多尺度结构相似性图像质量评价 [J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(1):127-134.
- SUN Y J, YANG Y F, LIU D L, et al. Image quality assessment using multi-scale structure similarity based on internal generation mechanism [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1):127-134.
- [12] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C]. *Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2003:1398-1402.
- [13] ZHANG T, LIU L, GAO T CH, et al. The actuality and progress of whole sky infrared cloud remote sensing techniques [J]. *Instrumentation*, 2015, 2(3):65-74.
- [14] 刘小燕, 郭群, 龚军辉, 等. 基于面部红外热图的恐惧情绪识别 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(3):353-360.
- LIU X Y, GUO Q, GONG J H, et al. Emotional recognition of fear based on facial infrared thermography [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(3):353-360.
- [15] 于彤, 马社祥, 刘铁根. 基于多尺度边缘结构相似性的图像质量评价 [J]. *光电子·激光*, 2009, 20(6):843-846.
- YU T, MA SH X, LIU T G. Image quality assessment based on multi-scale edge structure similarity [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(6):843-846.
- [16] YOUNG R A. The Gaussian derivative theory of spatial vision: Cortical model [J]. *Spatial Vision*, 1985, 14(3):261-319.
- [17] 闫钧华, 朱智超, 孙思佳, 等. 基于多尺度红外与可见光图像配准研究 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(3):329-333.
- YAN J H, ZHU ZH CH, SUN S J, et al. Research on multi-scale registration of infrared and visible images [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3):329-333.
- [18] 李俊山, 杨威, 张雄美. 红外图像处理、分析与融合 [M]. 北京: 科学出版社, 2009:203-204.
- LI J SH, YANG W, ZHANG X M. Infrared image processing, analysis and fusion [M]. Beijing: Science Press, 2009:203-204.
- [19] 李壮. 异源图像匹配关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- LI ZH. Research on key technologies of heterogeneous image matching [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [20] 周酥. 基于快速傅里叶变换的心电模板匹配算法设

- 计[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(5):26-28, 33.
- ZHOU S. Design of ECG template matching algorithm based on fast Fourier transform[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 35(5):26-28, 33.
- [21] RONG H J, JIA Y X, ZHAO G SH. Aircraft recognition using modular extreme learning machine[J]. Neurocomputing, 2014, 128(5):166-174.
- [22] 吴良圆, 魏书宁, 周棒棒, 等. 基于 PCA 降维的分层超限学习机手势识别方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(3):82-88.
- WU L Y, WEI SH N, ZHOU B B, et al. Gesture recognition method of hierarchical transfinite learning machine based on PCA dimension reduction[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(3):82-88.
- [23] 原玥, 王宏, 原培新, 等. 一种改进的 Hu 不变矩算法在存储介质图像识别中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):1042-1048.
- YUAN Y, WANG H, YUAN P X, et al. Application of an improved Hu invariant moment algorithm in image recognition of storage medium[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5):1042-1048.
- [24] 范浩锋, 刘俊. 基于 BP 神经网络的红外目标识别技术[J]. 计算机与数字工程, 2013, 4(41):559-560, 653.
- FAN H F, LIU J. Target recognition technology for targets in infrared images based on BP neural network[J]. Computer and digital engineering, 2013, 4(41):559-560, 653.

- [25] 范彬, 冯云松. 支持向量机在红外成像自动目标识别中的应用[J]. 红外技术, 2007, 29(1):38-41.

FAN B, FENG Y S. Application of support vector machine in automatic target recognition of infrared images[J]. Infrared Technology, 2007, 29(1):38-41.

作者简介



闻新, 1984 年于沈阳建筑大学获得学士学位, 1995 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 主要研究方向为航天器总体设计、航天器编队飞行和航天器智能故障诊断。

E-mail: xinw@nuaa.edu.cn

Wen Xin received his B. Sc. degree from Shenyang Jianzhu University in 1984 and received his M. Sc. and Ph. D. degrees from Harbin Institute of Technology in 1995. Now he is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include spacecraft design, spacecraft formation flying and intelligent fault diagnosis.



谢天夏(通讯作者), 2015 年于南京工业大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为多源图像配准、融合与识别。

E-mail: 273478902@qq.com

Xie Tianxia (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nanjing University of Technology in 2015. Now she is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include registration, fusion and recognition of multi-source images.