



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
04
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第20卷第4期（总第228期）

2015年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

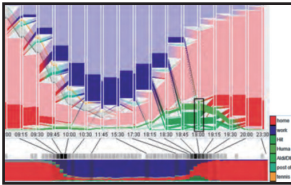
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

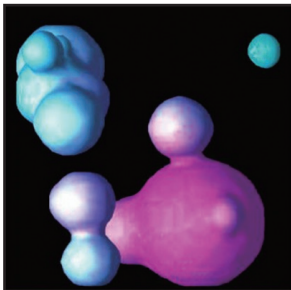
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

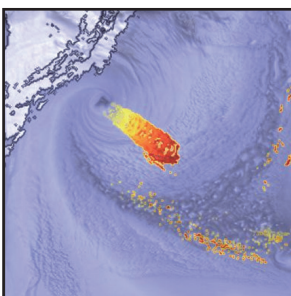
国内定价 50.00元



城市道路交通数据可视分析
综述(第0454页)



可视数据清洗综述
(第0468页)



非对称高斯函数的时变体数
据特征跟踪及可视化
(第0576页)

大数据可视分析

“大数据可视分析”专栏序

梁荣华	0453
城市道路交通数据可视分析综述	
姜晓睿, 田亚, 蒋莉, 梁荣华	0454
可视数据清洗综述	
王铭军, 潘巧明, 刘真, 陈为	0468
基于结构特征的自适应光线投射算法	
罗月童, 张伟, 石放放, 谭文敏	0483
面向浏览器的医学影像可视化系统	
雷辉, 赵颖, 王铭军, 周芳芳	0491

图像处理 and 编码

背投式多投影系统中各向异性问题的研究

王修晖, 王康健, 陆慧娟	0499
可见光与红外图像区域级反馈融合算法	
谷雨, 苟书鑫, 熊文卓, 刘俊, 薛安克	0506
结合天空识别和暗通道原理的图像去雾	
李加元, 胡庆武, 艾明耀, 严俊	0514

图像分析和识别

基于中层时空特征的人体行为识别

王泰青, 王生进	0520
----------------	------

计算机图形学

TBR架构GPU中三角形高效光栅化

符鹤, 谢永芳	0527
---------------	------

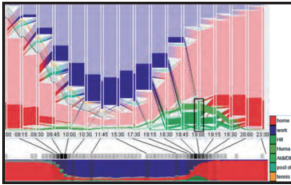
第十届中国计算机图形学大会专栏

V-系统在3D模型数字水印中的应用

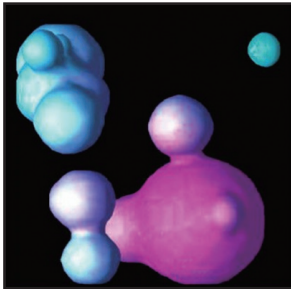
宋瑞霞, 徐燕青, 王小春, 李成华, 王俊, 齐东旭	0533
微距摄影的多聚焦图像拍摄和融合	
赵毅力, 周屹, 徐丹	0544
结合区域配对的室外阴影检测	
艾维丽, 吴志红, 刘艳丽	0551
多尺度粗糙表面的实时绘制方法	
过洁, 潘金贵	0559
体参数化模型离散调和映射生成	
陈龙, 刘玉生, 徐岗	0568
非对称高斯函数的时变体数据特征跟踪及可视化	
白志慧, 周志光, 杨瑞飞, 陶煜波, 林海	0576

CONTENTS

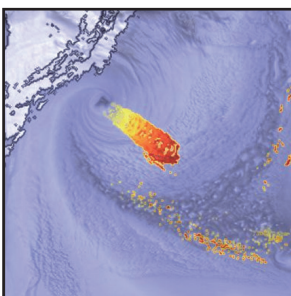
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Visual analytics of urban road transportation data: a survey (P0454)



Survey of visualization data cleaning(P0468)



Time-varying volume visualization and feature tracking based on asymmetric Gaussian function(P0576)

Visual Analytics Towards Big Data

Visual analytics of urban road transportation data: a survey Jiang Xiaorui, Tian Ya, Jiang Li, Liang Ronghua	0454
Survey of visualization data cleaning Wang Mingjun, Pan Qiaoming, Liu Zhen, Chen Wei	0468
Structure feature based adaptive ray casting algorithm Luo Yuetong, Zhang Wei, Shi Fangfang, Tan Wenmin	0483
HTML5-based medical image visualization system Lei Hui, Zhao Ying, Wang Mingjun, Zhou Fangfang	0491

Image Processing and Coding

Research on anisotropy problems under rear-projection multi-projector tiled display wall Wang Xiuhui, Wang Kangjian, Lu Huijuan	0499
Visible and infrared image region-level feedback fusion algorithm Gu Yu, Gou Shuxin, Xiong Wenzhuo, Liu Jun, Xue Anke	0506
Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior Li Jiayuan, Hu Qingwu, Ai Mingyao, Yan Jun	0514

Image Analysis and Recognition

Human action recognition using mid-level spatial-temporal features Wang Taiqing, Wang Shengjin	0520
---	------

Computer Graphics

High efficiency triangle raster algorithm in GPU based on TBR architecture Fu He, Xie Yongfang	0527
---	------

Column of Chinagraph'2014

Application of the V-system to digital watermark of 3D models Song Ruixia, Xu Yanqing, Wang Xiaochun, Li Chenghua, Wang Jun, Qi Dongxu	0533
Multi-focus image capture and fusion system for macro photography Zhao Yili, Zhou Yi, Xu Dan	0544
Outdoor shadow detection with paired regions Ai Weili, Wu Zhihong, Liu Yanli	0551
Real-time rendering of multi-scale rough surfaces Guo Jie, Pan Jingui	0559
Generation of volume parameterization model based on discrete harmonic mapping Chen Long, Liu Yusheng, Xu Gang	0568
Time-varying volume visualization and feature tracking based on asymmetric Gaussian function Bai Zhihui, Zhou Zhiguang, Yang Ruifei, Tao Yubo, Lin Hai	0576

中图法分类号: TP391; TP75 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)04-0506-08

论文引用格式: Gu Y, Gou S X, Xiong W Z, Liu J, Xue A K. Visible and infrared image region-level feedback fusion algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(4): 0506-0513. [谷雨, 苟书鑫, 熊文卓, 刘俊, 薛安克. 可见光与红外图像区域级反馈融合算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 0506-0513.] [DOI:10.11834/jig.20150406]

可见光与红外图像区域级反馈融合算法

谷雨¹, 苟书鑫¹, 熊文卓², 刘俊¹, 薛安克¹

1. 杭州电子科技大学通信信息传输与融合技术国防重点学科实验室, 杭州 310018;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

摘要: 目的 可见光图像具有丰富的纹理信息, 红外图像具有较强的目标指示信息, 进行融合时只有合理地设计融合规则才能充分利用两者的互补信息, 为此, 提出一种基于效果评估的可见光与红外图像区域级反馈融合算法。**方法** 首先对待融合图像进行非下采样轮廓波变换(NSCT), 将其分解为低频和高频部分。同时采用分形特征对红外图像进行人造目标增强, 通过阈值分割得到目标区域与背景区域。在设计低频融合规则时, 选取目标区域与背景区域的加权融合系数作为参数, 根据图像融合效果评估的量化指标, 运用遗传算法进行参数的优化求解。对高频部分采用基于区域的加权平均融合规则。最后, 利用优化后的融合系数进行 NSCT 逆变换得到融合图像。**结果** 采用 3 组图像, 结合主观评价和客观评价指标对 4 种融合算法的结果进行了比较分析, 实验结果表明, 本文算法融合后图像更自然, 目标更显著, 客观评价结果总体上最优。**结论** 本文算法有效结合了红外图像的目标信息与可见光图像的背景信息, 融合图像具有更强的对比度, 有利于进行战场态势显示和目标识别任务。**关键词:** 图像融合; 效果评估; 非下采样轮廓波变换; 分形特征; 遗传算法

Visible and infrared image region-level feedback fusion algorithm

Gu Yu¹, Gou Shuxin¹, Xiong Wenzhuo², Liu Jun¹, Xue Anke¹

1. Fundamented Science on Communication Information Transmission and Fusion Technology Laboratory, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: **Objective** A fusion rule must be reasonably designed to make full use of complementary information, namely, the rich texture information in visible images and the strong object-targeting information in infrared images. **Method** A visible and infrared image region-level feedback fusion algorithm is proposed on the basis of performance evaluation. The images to be fused are initially decomposed into their low-frequency and high-frequency parts via the nonsubsampling contourlet transform (NSCT). Meanwhile, fractal features are adopted to perform man-made object enhancement of infrared images. Object and background areas are then obtained through threshold segmentation. In the design of low-frequency fusion rule, the weighted fusion coefficients of the object and background areas are selected as parameters. A genetic algorithm is used to optimize these parameters in accordance with the performance evaluation of fusion results. A regional weighted average fusion rule is used to fuse high-frequency parts. Finally, inverse NSCT is performed to obtain the fusion image with the optimized parameters. **Result** Three sets of images are used to compare the performance of four fusion algorithms by subjective and ob-

收稿日期: 2014-08-11; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174024); 浙江省教育厅项目(Y201223278)

第一作者简介: 谷雨(1982—), 男, 讲师, 2009 年于浙江大学获控制科学与工程博士学位, 主要研究方向为多传感器融合、计算机视觉。

E-mail: guyu@hdu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61174024)

jective evaluation. Experimental results demonstrate that the fusion images from the proposed algorithm are natural and that the objects in the images are notable. Furthermore, the objective evaluation result is optimal. **Conclusion** The proposed algorithm can combine the object information from infrared images and the background information from visible images. The resulting fusion images have a strong contrast, which is beneficial for battlefield situation display and object recognition tasks.

Key words: image fusion; performance evaluation; nonsubsampling contourlet transform; fractal feature; genetic algorithm

0 引言

图像融合是指通过特定算法将两幅或多幅图像合成一幅新图像,通过融合可充分利用多源图像的互补信息,使更适合人的视觉和更有利于计算机的检测、识别等处理需求^[1]。

多分辨率分析技术,如金字塔变换、小波变换等,由于能够反映人的视觉特性,因而广泛应用于图像融合领域。非下采样轮廓波变换(NSCT)不仅具有多尺度、良好的空域、频域和方向特性,还具有平移不变性,综合了基于多分辨分析的图像融合方法优势,因而基于NSCT变换的融合方法可以改善图像融合的效果^[2]。合理地设计融合规则对于融合效果至关重要。传统的融合规则,如文献[3],采用加权平均和基于区域能量这类凭主观经验设置融合参数,该方法适用范围有一定局限性,很难保证融合图像质量。在对融合效果进行评估基础上,通过融合参数进行优化能够提高图像融合的效果,逐步受到研究学者的关注^[4-5]。文献[6]提出了一种基于NSCT变换的图像融合,低通子带引入闭环反馈策略自适应获取最优融合权值。为提高人脸识别效果,文献[7]采用粒子群优化算法对红外与可见光图像的低频融合系数进行优化。文献[8]提出了一种改进的多目标粒子群优化算法,选取图像融合的客观评价指标作为优化目标函数,实验结果表明,与传统的融合算法比较在客观性能指标上得到了提高。文献[9]提出了一种基于Shearlet变换的可见光与红外图像自适应融合算法,采用了粒子群优化算法确定出低频部分的最佳融合权值,自适应地对可见光与红外图像的低频系数进行整合。

红外图像能很好反映与背景温差较大的人造目标,而可见光图像所具有的空间分辨率能很好反映场景细节信息。本文提出一种基于效果评估的可见光与红外图像区域级反馈融合算法,该算法对待融合图像进行NSCT变换,将其分解为低频和高频部

分,同时采用分形特征对红外图像进行人造目标增强,通过阈值分割得到目标区域和背景区域。在低频部分根据分割结果选择不同的融合系数,基于遗传算法根据融合指标进行优化选择。最后利用优化后的融合系数进行NSCT逆变换得到融合图像。实验结果验证了本文算法的有效性。

1 基于多尺度分形的红外图像人造目标增强

根据分形理论^[10],分形模型在一定的尺度范围内能与自然景物的表面与空间结构相吻合,而人造目标的表面和空间结构与分形模型所表达的规律性存在固有差异。即自然景物具有分形特征,而人造目标不具有分形特征。根据这种分形特征的不同就可以提取出自自然景物中的人造目标,实现对人造目标的增强。

依据分形理论,2维灰度图像的表面面积测度表示为

$$A(x, y, \varepsilon) = K(x, y, \varepsilon) \varepsilon^{2-FD(x, y, \varepsilon)} \quad (1)$$

式中, $A(x, y, \varepsilon)$ 表示在尺度 ε 下表面面积测度, FD 表示分形维数, K 为分形参数。

当度量尺度分别为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 时,由式(1)可得

$$\log 2A(x, y, \varepsilon_1) = (2 - FD(x, y, \varepsilon_1)) \log 2(\varepsilon_1) + \log 2K(x, y, \varepsilon_1) \quad (2)$$

$$\log 2A(x, y, \varepsilon_2) = (2 - FD(x, y, \varepsilon_2)) \log 2(\varepsilon_2) + \log K(x, y, \varepsilon_2) \quad (3)$$

假设在不同尺度下式(2)(3)中的分形维数 FD 是常数,令 $\varepsilon_1 = \varepsilon, \varepsilon_2 = \varepsilon - 1$,则由式(2)(3)可得

$$K(x, y, \varepsilon) = \exp \left(\frac{\log A(x, y, \varepsilon) \log(\varepsilon - 1) - \log A(x, y, \varepsilon - 1) \log(\varepsilon)}{\log(\varepsilon - 1) - \log(\varepsilon)} \right) \quad (4)$$

为了突出自然景物和人造目标的 $K(x, y, \varepsilon)$ 随尺度 ε 变化的差别,定义了一个随分形参数变化的度量函数,即与 $K(x, y, \varepsilon)$ 相关的多尺度分形特

征为^[11]

$$M(x, y) = \sum_{\varepsilon=2}^{\varepsilon_{\max}} \left[K(x, y, \varepsilon) - \frac{1}{\varepsilon_{\max} - 1} \sum_{\varepsilon=2}^{\varepsilon_{\max}} K(x, y, \varepsilon) \right]^2 \quad (5)$$

$\varepsilon_{\max}$ 为计算分形参数时所取的最大尺度, $\varepsilon_{\max} \in \mathbf{N}, \varepsilon_{\max} \geq 2$ 。 $M(x, y)$ 即可用来突出人造目标与自然背景在分形特征上的差异。

对红外图像进行基于多尺度分形特征的人造目

标增强,通过设置最大尺度 $\varepsilon_{\max} = 4$, 计算红外图像中每个像素的多尺度分形特征,可得红外图像的人造目标增强后图像。对增强后图像 E_{Image} 根据阈值 T 进行目标分割,得到目标分布图

$$I_o = I_e \geq T \quad (6)$$

图 1(a)(b) 分别表示同一场景下可见光与红外图像,图 1(c) 为增强后图像,当 $T=5$ 时,目标分布图如图 1(d) 所示。从图 1 中可以看出,人、房屋和道路等人造目标均被很好地检测到。

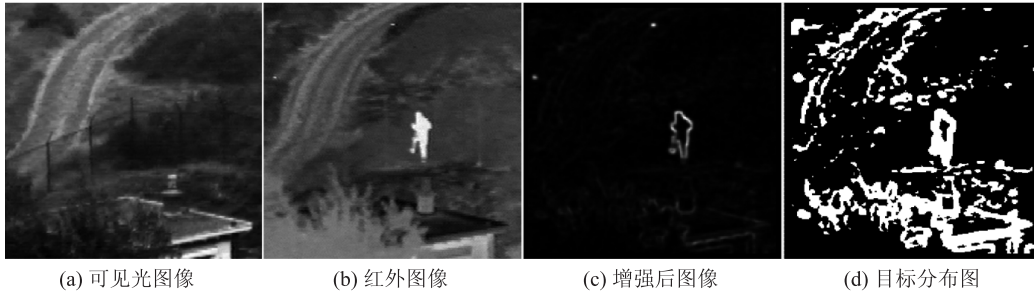


图 1 红外人造目标增强图及目标分布图

Fig. 1 Man-made object enhanced infrared image and object distribution picture

2 融合效果评估指标

对融合效果进行评估分为主观评价法和客观评价法^[12]。主观评价法就是通过人眼观察直接对图像的质量进行评估,而客观评价法是用客观的数据来定量分析融合图像的质量,本文采用信息熵、标准差和边缘保持度评价指标作为目标函数对融合参数优化,构建区域级反馈图像融合框架。

1) 信息熵。信息熵是用来衡量图像信息丰富程度的指标。融合图像的信息熵越大,说明融合图像的信息量越丰富,融合效果越好。信息熵定义为

$$E_1 = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2(P_i) \quad (7)$$

式中, P_i 表示图像中像素为 i 的概率分布, L 为图像总的灰度级数。

2) 标准差。标准差表示图像像素值的分布情况,可用于衡量图像的清晰度和对比度。标准差越大,对比度越大。标准差定义为

$$E_2 = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) - \bar{I})^2} \quad (8)$$

式中, $I(i, j)$ 为图像在 (i, j) 处的像素值, $\bar{I} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i, j)$ 为图像像素的平均值, M, N 分别为图像的高度和宽度。

3) 边缘保持度。边缘保持度可衡量融合图像中的边缘信息的保持程度,其值越大说明融合图像保留的边缘信息越多。当待融合图像分别为 A 和 B , 融合后图像为 F 时,边缘保持度定义为

$$E_3 = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} Q^{AF}(i, j) w^A(i, j) + Q^{BF}(i, j) w^B(i, j)}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} (w^A(i, j) + w^B(i, j))} \quad (9)$$

式中, $Q^{AF}(i, j)$ 与 $Q^{BF}(i, j)$ 分别表示原始图像与融合图像的边缘保持量, $w^A(i, j)$ 与 $w^B(i, j)$ 为权重,具体计算公式参见文献[13]。

3 基于效果评估的区域级反馈融合算法

3.1 算法总体框架

本文基于效果评估的可见光与红外图像区域级反馈融合算法框图如图 2 所示。对待融合图像

进行 NSCT 变换分解得到低频和高频部分。采用分形特征对红外图像进行增强, 根据阈值分割得到的目标分布图实现低频部分目标与背景区域的分别融合。

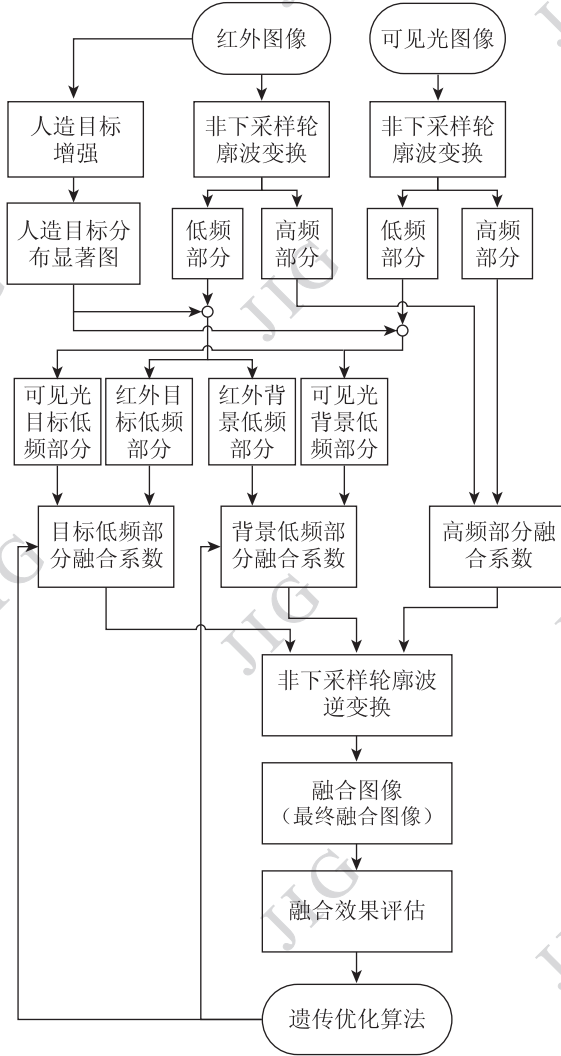


图2 基于效果评估的区域级反馈融合算法框图

Fig. 2 The architecture of region-level feedback fusion algorithm based on performance evaluation

在设计低频融合规则时, 选取目标区域与背景区域的加权融合系数作为参数。由于低频部分包含图像的主要能量, 对低频部分融合系数的选择很大程度上决定了融合图像的质量, 因此本文算法在融合图像效果评估基础上, 基于遗传算法对低频部分融合系数进行优化, 以提高融合的效果。对高频部分采用基于区域性选择的加权平均融合规则。最后, 利用优化后的融合系数再进行 NSCT 逆变换得到最终的融合图像。

3.2 非下采样轮廓波变换

非下采样轮廓波变换^[14]是一种具有平移不变性的多分辨率、多尺度、多方向和局部化的图像变换形式, 其分解结构图如图3所示。NSCT 采用非下采样的金字塔分解 (NSP) 和非下采样的方向滤波器组 (NSDFB), 把图像分解成低频部分和带通高频部分, 使得 NSCT 变换具有多尺度和多方向分解特性。

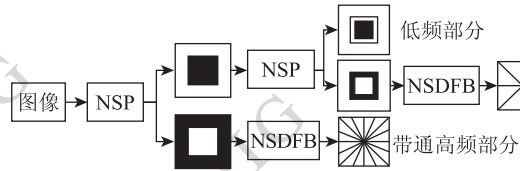


图3 非下采样轮廓波变换

Fig. 3 Nonsubsampled contourlet transform

3.3 低频部分融合规则

传统低频部分融合规则采用基于像素的加权平均或基于像素邻域的区域能量法。根据增强后红外图像的分割结果, 选择目标区域和背景区域低频部分融合系数的权重参数 a 和 b 作为参数, 具体融合规则为

$$C^f(i, j) = a \cdot O(i, j) \cdot C^i(i, j) + (1 - a) \cdot O(i, j) \cdot C^v(i, j) + b \cdot \bar{O}(i, j) \cdot C^i(i, j) + (1 - b) \cdot \bar{O}(i, j) \cdot C^v(i, j) \quad (10)$$

式中, $C^i(i, j)$ 和 $C^v(i, j)$ 分别表示经过分解后红外与可见光图像的低频部分系数, O 为获得的目标分布图, $O(i, j) = 1$ 表示目标区域像素, $O(i, j) = 0$ 为背景区域像素, $\bar{O}(i, j) = 1 - O(i, j)$ 。

3.4 高频部分融合规则

为得到细节较丰富、清晰度较高的融合图像, 采用基于区域的加权平均融合规则进行高频部分系数融合^[15]。具体步骤如下:

1) 以点 (i, j) 为中心的区域 Q 内, 红外与可见光图像高频部分系数分别为 $c_A(m, n)$ 、 $c_B(m, n)$, 计算区域内系数方差分别为 $S_A(i, j)$ 、 $S_B(i, j)$ 。

2) 计算归一化互相关系数

$$M_{AB}(i, j) = \frac{2}{S_A(i, j) + S_B(i, j)} \times \sum_{(m, n) \in Q} w(m, n) c_A(m, n) c_B(m, n) \quad (11)$$

式中, $w(m, n)$ 表示窗口内每点像素系数的权重。

3) 若 $M_{AB}(i, j) < T$ (本文令 $T = 0.85$), 表明原始高频系数图像间相关性较低, 选取局部方差大的高频系数为融合后的高频系数, 即

$$c_F(i, j) = \begin{cases} c_A(i, j) & S_A(i, j) \geq S_B(i, j) \\ c_B(i, j) & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

当 $M_{AB}(i, j) > T$ 时, 采用加权平均法, 即

$$c_F(i, j) = w_1(i, j) \cdot c_A(i, j) + [1 - w_1(i, j)] \cdot c_B(i, j) \quad (13)$$

权重系数为

$$w_1(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{AB}(i, j)}{1 - T} \right) & S_A(i, j) \geq S_B(i, j) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{AB}(i, j)}{1 - T} \right) & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

3.5 基于遗传算法的低频融合系数优化

遗传算法具有算法简单, 可并行处理, 能有效降低问题的复杂度等优点, 是一种广泛使用的智能优化算法。本文采用遗传算法对低频部分融合系数进行优化。在遗传算法染色体编码方式设计中采用了长度为 10 位的二进制编码串分别表示式(10)中两个待优化的参数 a 、 b 。由于 10 位二进制编码串可以表示 0 至 1023 之间的 1024 个不同的数, 则 a 、 b 的定义域可离散化为 1023 个均等的区域。将分别表示 a 、 b 的两个 10 位二进制编码串

连接在一起组成一个 20 位的二进制编码串, 即为染色体编码方式。采用式(7)~(9)的信息熵、标准差和边缘保持度 3 种效果评估指标的加权和作为适应度函数, 即

$$E_{\text{fitness}} = w_1 d_1 E_1 + w_2 d_2 E_2 + w_3 d_3 E_3 \quad (15)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 表示权重, d_1 、 d_2 、 d_3 表示量纲, 使各融合效果评价指标的数值在同一量级。遗传算法具体求解步骤参见文献[16]。

4 实验结果分析

为验证本文算法的有效性, 通过实验比较了基于离散小波变换(DWT)、基于拉普拉斯金字塔变换(LPT)和文献[3]中基于 NSCT 变换的融合算法性能。其中基于离散小波变换的融合算法在低频和高频部分分别采用加权平均和绝对值取大的融合规则; 基于拉普拉斯金字塔变换的融合算法的分解层数为 3 层, 低频和高频部分融合规则分别采用加权平均法和绝对值取大法; 文献[3]中基于 NSCT 变换的图像融合在低频和高频部分分别采用加权平均和基于区域面积的融合规则。为说明本文算法的适用性, 采用 3 组场景的可见光与红外图像进行了上述 4 种算法的对比实验, 融合效果对比分别如图 4—图 6 所示, 其中图 4 采用图 1(a)(b)作为待融合图像。



图 4 场景 1 图像融合结果图

Fig. 4 Image fusion results for scenario 1

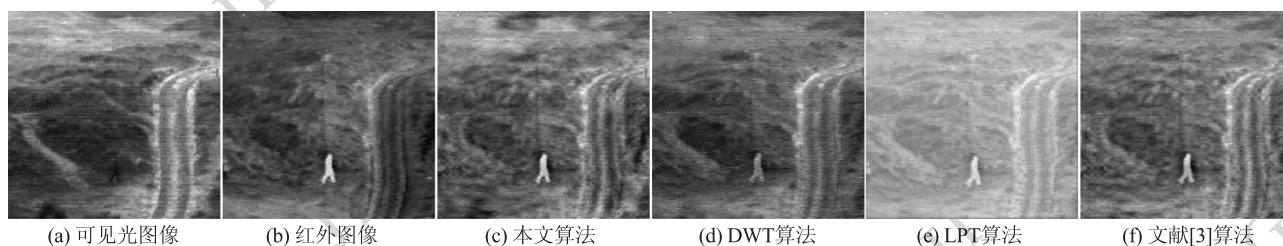


图 5 场景 2 图像融合结果图

Fig. 5 Image fusion results for scenario 2

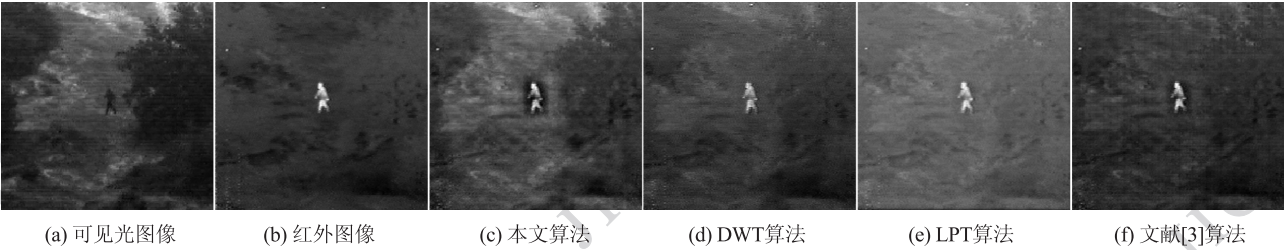


图 6 场景 3 图像融合结果图
Fig. 6 Image fusion results for scenario 3

对于场景 1,待融合的可见光图像中行人目标受树木等遮挡,而红外图像中目标突出。由于基于效果评估进行了融合参数的优化选择,从图 4 可以看出,本文算法的融合图像视觉效果最佳,目标更显著;DWT 算法和文献[3]算法的融合图像目标对比度较低;LPT 算法融合图像背景偏亮,纹理细节较模糊。对于场景 2,DWT 算法融合图像目标偏暗,LPT 算法融合图像清晰度较差,文献[3]算法与本文算法由于采用 NSCT 变换,所以融合后图像的对比度较高。场景 3 中目标(人)在可见光与红外图像中极性相反,红外图像中虽目标显著,但很难分辨场景背景(道路与周围树木)。当采用 DWT、LPT 和文献[3]算法时,由于对低频部分系数加权平均时采用的加权系数不是最优的,所以融合后图像的对比度不高,尤其是基于文献[3]的融合算法对比度最低,本文算法融合效果最好,融合后图像能够分辨场景内容。

从优化后的低频部分参数看,如表 1 所示,对于场景 1,目标区域由约 80% 的红外图像信息和约 20% 的可见光图像信息组成,而背景区域由约 1% 的红外图像背景和约 99% 的可见光图像背景组成,这使融合图像包含了可见光图像丰富的背景信息,故融合后图像更自然,目标更显著。

为客观评价各种算法的性能,选择信息熵、标准差、边缘保持度、联合熵、互信息和平均梯度 6 种客观评价指标^[12]来衡量图像融合效果,其中信息熵、标准差和边缘保持度也作为遗传算法的适应度函数。上述 3 种场景客观评价结果如表 2—表 4 所示。对于场景 1,采用经过优化的参数,本文算法融合结果的信息熵、标准差和边缘保持度指标优于其他 3 种算法,说明采用本文算法融合图像像素分布最广泛,因而融合图像的显示效果最好。由于本文算法对低频部分融合系数进行了优化,从表 2—表 4 可以看出,本文算法的融合图像评价指标结果总体上优于文献[3]算法。对于场景 3,本文算法融合结果的各项指标均优于其他 3 种算法。这说明基于融合效果评价指标采用遗传算法对低频部分融合参数进行优化是可行和有效的。

表 1 低频部分融合参数值

Table 1 Low-frequency fusion parameter values			
优化参数	场景 1	场景 2	场景 3
<i>a</i>	0. 835 777	0. 848 485	0. 259 042
<i>b</i>	0. 009 775	0. 017 595	0. 030 303

表 2 场景 1 的各融合算法客观评价结果

Table 2 Objective evaluation results of image fusion algorithms for scenario 1						
融合算法	信息熵	标准差	边缘保持度	联合熵	互信息	平均梯度
DWT	4. 749 015	0. 130 175	0. 204 292	12. 856 886	0. 662 956	8. 018 299
LPT	4. 616 658	0. 109 578	0. 205 926	12. 725 606	0. 621 595	7. 328 286
文献[3]	4. 574 075	0. 102 334	0. 241 891	12. 795 849	0. 530 324	7. 490 864
本文	4. 786 725	0. 132 404	0. 242 336	12. 932 872	0. 640 240	7. 206 075

表 3 场景 2 的各融合算法客观评价结果

Table 3 Objective evaluation results of image fusion algorithms for scenario 2

融合算法	信息熵	标准差	边缘保持度	联合熵	互信息	平均梯度
DWT	4. 859 216	0. 123 315	0. 295 941	12. 336 814	0. 538 286	10. 226 370
LPT	4. 383 844	0. 139 295	0. 210 051	11. 665 395	0. 528 307	6. 896 419
文献[3]	4. 733 741	0. 108 493	0. 317 139	12. 280 575	0. 451 792	9. 650 521
本文	4. 894 676	0. 127 415	0. 328 431	12. 499 622	0. 460 896	9. 911 156

表 4 场景 3 的各融合算法客观评价结果

Table 4 Objective evaluation results of image fusion algorithms for scenario 3

融合算法	信息熵	标准差	边缘保持度	联合熵	互信息	平均梯度
DWT	4. 556 328	0. 091 877	0. 230 200	11. 713 616	0. 660 187	7. 424 699
LPT	4. 237 838	0. 097 209	0. 203 335	11. 325 714	0. 610 569	5. 602 166
文献[3]	4. 423 965	0. 082 223	0. 258 405	11. 682 013	0. 549 729	6. 665 451
本文	4. 756 770	0. 114 460	0. 275 252	11. 962 675	0. 687 994	7. 557 190

综合融合图像和指标评价结果,本文提出的算法充分结合了红外图像的人造目标指示特性和可见光图像丰富的背景信息,使融合图像目标对比度更强,融合后图像视觉效果更好。

表 5 为各算法的运行时间(10 次运行的平均时间)。运行环境:Windows XP 32 位操作系统,Matlab R2011b, Intel Pentium 2. 6 GHz CPU, 2 GB 1 067 MHz 内存。本文算法由于采用了遗传算法对低频部分系数进行了优化,因而算法运行时间较长。为满足算法的实时性需求,一方面可利用遗传算法的并行处理能力,另一方面可采用编译型语言提高算法的运行速度。

表 5 各算法运行时间

Table 5 The algorithm running time

融合算法	场景 1	场景 2	场景 3
DWT	0. 240 321	0. 244 999	0. 251 632
LPT	0. 105 205	0. 098 858	0. 104 586
文献[3]	0. 403 215	0. 388 479	0. 384 410
本文	76. 838 212	79. 338 245	82. 909 315

5 结 论

本文提出了一种基于效果评估的可见光与红外

图像区域级反馈融合算法,来解决融合图像目标信息不突出和背景细节信息模糊的问题,通过实验验证了本文算法的有效性。采用本文算法融合后的图像能够充分利用可见光与红外图像的优势信息,提高了图像显示效果及目标对比度,有利于后续的战场态势显示和目标识别任务。

参考文献 (References)

[1] Zhao Z G, Xiong Z H, Wang K, et al. Conceptions, Methods and Applications on Information fusion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 282-291. [赵宗贵, 熊朝华, 王珂, 等. 信息融合概念、方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 282-291.]

[2] Li S T, Yang B, Hu J W. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion[J]. Information Fusion, 2011, 12(2): 74-84.

[3] Zhang J L, Zhao E Y. Fusion method for infrared and visible light images based on NSCT[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(3): 319-322. [张惊雷, 赵俄英. 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 319-322.]

[4] Petrovic V, Cootes T. Objectively adaptive image fusion[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 168-176.

[5] An H N, Qi Y L, Cheng Z Y. A novel image fusion method based on particle swarm optimization[C]// Advances in Wireless Networks and Information Systems. Berlin: Springer, 2010: 527-

- 535.
- [6] Yang X H, Jia J, Jiao L C. Image fusion algorithm in nonsub-sampled contourlet domain based on activity measure and closed loop feedback[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(2): 422-426. [杨晓慧, 贾建, 焦李成. 基于活性测度和闭环反馈的非下采样 Contourlet 域图像融合[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 422-426.]
- [7] Raghavendra R, Dorizzi B, Rao A, et al. Particle swarm optimization based fusion of near infrared and visible images for improved face verification[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(2): 401-411.
- [8] Li J, Nan X L, Bi S Y, et al. Image fusion based on an improved algorithm of multi-objective particle swarm optimization [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(1): 477-480. [李娟, 南旭良, 毕思远, 等. 改进多目标粒子群优化算法及在图像融合中的应用[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(增刊1): 477-480.]
- [9] Deng C Z, Rao W. Shearlet based adaptive fusion of infrared and visible images[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(4): 399-403. [邓承志, 饶伟. 基于 Shearlet 变换的红外与可见光图像自适应融合[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 399-403.]
- [10] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco; Freeman, 1982.
- [11] Liu J. Moving ship detection and tracking from infrared image for collision-avoidance of ships [J]. Opto-electronic Engineering, 2010, 37(9): 8-13. [刘俊. 面向船舶避碰预警的红外运动船舶检测与跟踪[J]. 光电工程, 2010, 37(9): 8-13.]
- [12] Gao S S, Jin W Q, Wang L X, et al. Objective quality assessment of image fusion [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 671-677. [高绍姝, 金伟其, 王岭雪, 等. 图像融合质量客观评价方法[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 671-677.]
- [13] Xydeas C S, Petrovic V. Objective pixel-level image fusion performance measure[J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 308-309.
- [14] da Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design and applications[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [15] Pajares G, Cruz J. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(9): 1855-1872.
- [16] Lei X J. Swarm Intelligent Optimization Algorithms and Their Applications[M]. Beijing: Science Press, 2012: 46-53. [雷秀娟. 群智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 46-53.]