

红外与可见光图像的变分增强融合算法研究

陈磊 杨风暴 王志社 纪利娥 彭志浩

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 提出了一种基于变分法和梯度增强的红外与可见光图像融合算法。首先对红外与可见光的梯度特征进行自适应加权融合,得到初始融合梯度场;其次构建梯度特征增强模型,获得融合图像增强的梯度场;最后通过变分法将融合问题转换为最优化问题,得到最接近增强后梯度场的融合图像。实验结果表明,相比基于多分辨率框架下进行融合的拉普拉斯分解、小波变换及常见的基于变分的融合算法,所提出的算法得到的融合图像梯度特征最大,视觉效果最好,证明了算法的有效性。

关键词 图像处理; 图像融合; 变分法; 梯度增强; 目标识别

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.041003

Research on Fusion Algorithm of Infrared and Visible Imagery Based on Variational Enhanced Model

Chen Lei Yang Fengbao Wang Zhishe Ji Li'e Peng Zhihao

Information and Communication Engineering College, North University of China, Taiyuan,
Shanxi 030051, China

Abstract We propose an algorithm to fuse infrared and visible images based on variational method and gradient enhancement. Firstly, the gradient features of infrared and visible images are fused in an adaptively weighted way, and the original fused gradient field is obtained. Then the enhancement model for gradient features is constructed to get the enhanced gradient field of fusion image. Finally, the fusion problem is transformed to an optimization problem by using variational method. Thus a fusion image with the gradient field approaching the previously obtained enhanced gradient field can be achieved. Experimental results show that, in comparison with existing fusion algorithms based on multi-resolution concept such as Laplace decomposition, wavelet transform and variation-based fusion, our algorithm results in the maximal gradient feature and the best visual effects. The effectiveness of the proposed algorithm is proved.

Key words image processing; image fusion; variational method; gradient enhancement; target recognition

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 100.3008; 100.3010; 100.4994

1 引言

可见光图像能够比较清晰地反映地物轮廓,但在恶劣条件下容易丢失目标物体。而红外图像的对比度低,地物轮廓模糊,但在光线不好的情况下仍能反映出目标物体。所以红外和可见光图像融合的目的就是充分利用其互补信息,得到一幅地物信息描述更加全面可靠的融合图像,从而提高图像的清晰度和目标的可识别程度^[1-2]。

目前,对于红外与可见光图像的融合,像素级融合作为特征级和决策级融合的基础,成为研究的热点^[3],且研究最多的是基于多分辨率的图像融合方法,如基于拉普拉斯分解^[4]、小波变换(WT)^[5]、Contourlet变换^[6]和非下采样 Contourlet变换(NSCT)^[7-8]的图像融合。由于多分辨率分解过程与人类的视觉系统层次分析理解的特点非常相似,所以它可以在增强图像分辨率的同时,较好地保留源图像的光谱信息,获得特征明显改

收稿日期: 2013-11-14; 收到修改稿日期: 2013-12-04; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(20120706ZX)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20121420110004)

作者简介: 陈磊(1987—),男,硕士研究生,主要从事多源信息融合方面的研究。E-mail: chen137lei@126.com

导师简介: 杨风暴(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事红外信息处理方面的研究。E-mail: yangfb@nuc.edu.cn

善的融合图像。但为方便后续的图像处理,往往需要融合图像具有更高的清晰度,即在图像不失真的前提下保证梯度特征最优化,这就需要单独对图像的梯度特征进行处理。上述基于多分辨率框架的融合算法不易解决此类问题。而变分模型很容易对图像的梯度、曲率、切线方向和法线方向等重要几何信息进行处理,使得融合后的图像具有很好的效果。Johns Hopkins 大学 Socolinsky 等^[9]最先将变分法应用于图像融合,他们将融合源图像看成多值图像的分量图像,融合图像看成是多值图像,给出多值图像的梯度形式,将该梯度形式的主分量作为融合图像的目标梯度,然后通过构造一个最小能量泛函求解一个与目标梯度最为接近的图像作为融合图像。但该模型求解时将各个源图像的每一像素点看成是同等重要的,而图像融合的目的就是要取得各个源图像的不同特征,这些特征在本质上是不同分布的。刘建琴等^[6,10]尝试将脉冲神经网络(PCNN)引入变分融合模型中,来解决源图像的权重问题,虽取得了较好的融合效果,但加大了算法的复杂度,且不能保证融合图像达到显著特征最优化。

基于此,本文提出一种基于变分增强的红外与可见光图像融合算法,首先根据梯度模值的自适应加权方法得到融合图像的初始梯度场,然后构造一种梯度增强模型,获得融合图像的最优化梯度场,接着利用变分法得到梯度值接近最优化梯度的融合图像。实验结果表明该方法获得了很好的图像融合效果。

2 融合方法

本文提出的红外与可见光图像融合算法如图1所示。融合方法主要包括三部分:1) 梯度自适应融合,根据源图像的梯度场构建初始融合梯度场。2) 梯度增强模型,在融合图像不失真的情况下,获得最优化融合梯度场。3) 变分融合模型,利用变分法对初始图像进行优化,得到目标梯度最接近于最优化梯度的融合图像。

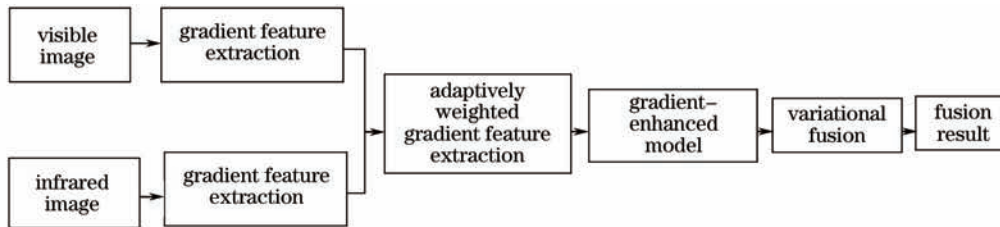


图1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of the proposed algorithm flowchart

3 算法描述

3.1 变分融合模型

最初,全变分(TV)模型被提出用于图像去噪,简要描述为 $u_0(x,y) = u(x,y) + n(x,y)$,其中 u_0 表示噪声图像, u 为所求的清晰图像, n 为加性噪声。其去噪结果就是求下面能量泛函的最小值:

$$\min \left\{ E(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy \right\}, \quad (1)$$

式中 Ω 为图像的支持域。(1)式中第一个积分项为正则项,它主要用来最小化图像梯度,使图像尽量平滑,以消除噪声;第二个积分项为保真项,它主要使我们求得的清晰图像和噪声图像相差不大。

研究表明,图像的梯度模值反映了图像边缘清晰度,梯度模值大的地方,视觉效果一般就比较好,图像细节比较清晰。对红外和可见光图像进行融合的目的,就是综合利用源图像的互补信息,在保证融合图像不失真的情况下,使融合图像的梯度最大化,即让融合图像的梯度逼近最优化融合梯度场,用公式表示为

$$\min \left\{ \int_{\Omega} |\nabla f - W| dx dy \right\}, \quad (2)$$

式中 $f(x,y)$ 表示所求的融合图像, $\nabla f = (\partial f / \partial x, \partial f / \partial y) = (f_x, f_y)$ 表示图像在 x, y 方向的梯度, W 为最优化的融合梯度场。

结合(1)式和(2)式,为获得最优的红外与可见光融合图像,建立如下数学模型:

$$E(f) = \min \left\{ \alpha \int_{\Omega} |\nabla f| dx dy + \beta \int_{\Omega} |\nabla f - W|^2 dx dy \right\}, \quad (3)$$

这样就把问题转换成求解能量泛函最小值的问题。(3)式中 $\alpha, \beta > 0$, 表示正则项和保真项的权重,可根据

实验选定。下面对(3)式中的极值问题进行求解。

记 $F = \alpha \nabla f + \beta |\nabla f - W|^2$, 根据变分方法可知, 当(3)式取极值时满足

$$\frac{\partial F}{\partial f} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial f_x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial f_y} = 0, \quad (4)$$

因此可以得到(3)式取极值满足的 Euler-Lagrange 方程为

$$\nabla_f E = -\partial \nabla \cdot \left(\frac{\nabla f}{|\nabla f|} \right) - 2\beta (\nabla^2 f - \text{div } W) = 0, \quad (5)$$

式中 $\nabla_f E$ 表示泛函 $E(f)$ 对函数 f 的梯度。这里采用梯度下降法进行求解:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla_f E, \quad (6)$$

写成离散迭代形式为

$$f^{k+1} = f^k + \partial \nabla \cdot \left(\frac{\nabla f^k}{|\nabla f^k|} \right) + 2\beta (\nabla^2 f^k - \text{div } W). \quad (7)$$

文献[6]已证明上式可收敛, 且通过迭代可求出融合图像 f 。在迭代过程中, f 的初值和 W 至关重要, 下面对这两个取值进行详细探讨。

3.2 梯度特征融合及其增强模型

对于红外图像 A 与可见光图像 B , 采用自适应加权方法进行梯度特征的融合, 得到初始融合梯度特征, 加权系数如下:

$$w_a = \frac{|\nabla A|}{|\nabla A| + |\nabla B|}, w_b = 1 - w_a, \quad (8)$$

式中 $|\nabla A|, |\nabla B|$ 分别表示红外图像 A 和可见光图像 B 的梯度模值。

由此可以得到融合图像的初值 f_0 和融合梯度特征 G :

$$f_0 = w_a \cdot A + w_b \cdot B, \quad (9)$$

$$G = w_a \cdot \nabla A + w_b \cdot \nabla B. \quad (10)$$

考虑到一幅图像在不失真的情况下, 梯度越大图像越清晰, 所以这里构建一个梯度增大模型对融合梯度进行增强, 使增强后的梯度在方向上与原梯度一致, 但在大小上均大于原梯度。在实际图像中, 梯度大的地方, 视觉效果本来就很好, 不需要增强。梯度小的部分才是需要增强的信息。考虑到噪声的影响, 建立梯度增强模型如下:

$$W = \begin{cases} k \cdot G, & |G| > \varepsilon \\ 0, & |G| \leq \varepsilon \end{cases}. \quad (11)$$

这里把模值小于 ε 的梯度当做噪声的影响进行去除。增强系数 k 构建如下:

$$k = 1 + \lambda_1 P^{-|\varepsilon|/\lambda_2}, \quad (12)$$

式中 $\lambda_1 > 0$ 表示最大放大倍数, $\lambda_2 > 0$ 表示放大系数随梯度增大而衰减的速度, $P > 1$ 表示此模型是衰减模型, 即只增强小的梯度值。

3.3 梯度增强模型中的参数设置

在讨论模型中参数 λ_1 、 λ_2 和 P 对融合图像质量的影响时, 分别固定其中两个参数, 通过实验验证融合图像质量随单一参数变化的情况。这里采用标准差 std 、信息熵 ent 、平均梯度 grad 和光谱扭曲度 dsd 作为图像的质量评价指标。图像的标准差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散程度, 标准差越大, 则图像灰度级越分散, 图像的反差越大, 可以看出更多的信息; 信息熵表示图像所包含平均信息量的多少, 信息熵越大, 图像效果越好; 平均梯度(清晰度)反映了图像的清晰程度, 还能反映出图像中微小细节反差与纹理变化特征, 是描述图像清晰程度的一个物理量, 平均梯度越大, 图像越清晰, 信息保留越多; 光谱扭曲度表示融合图像与源图像的光谱差异, 其值越小越好, 这里用来平衡其他三个评价质量, 防止图像失真。对 dsd 进行修正得 dsd1 , 表示为

$$F_{\text{dsd1}} = 1/F_{\text{dsp}}, \quad (13)$$

这样修正的光谱扭曲度 dsd1 越大, 图像质量就越好。图 2(a)、(b) 为输入的可见光和红外图像, 图 2(c)~(e) 分别给出了评价指标随着参数 λ_1 、 λ_2 和 P 的变化情况。由于各评价指标的值域不同, 所以分别对 std 、 enty 、 grad 和 dsd1 进行了归一化处理。

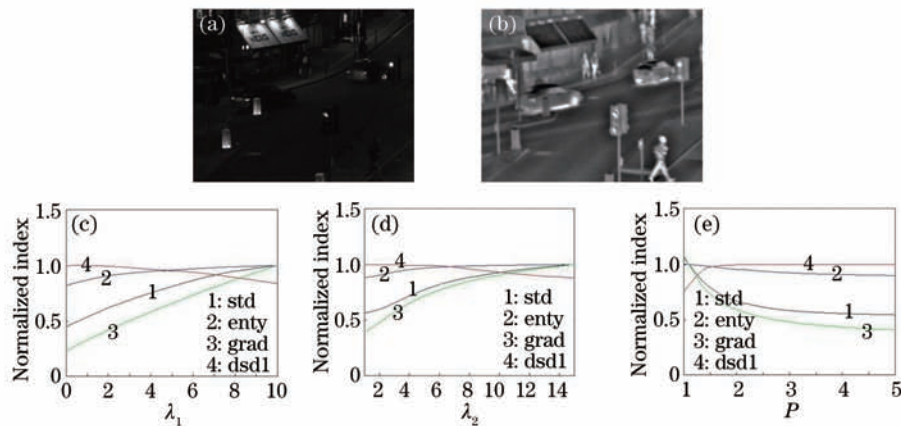


图 2 各参数对图像质量的影响。(a) 可见光图像; (b) 红外图像; (c) 参数 λ_1 的影响; (d) 参数 λ_2 的影响; (e) 参数 P 的影响

Fig.2 Influences of different parameters on image quality. (a) Visible image; (b) infrared image; (c) influence of λ_1 ; (d) influence of λ_2 ; (e) influence of P

进行了多次试验仿真验证。图 2(c) 为固定 $\lambda_2 = 8$ 、 $P = 1.5$ 时, 各评价指标随着 λ_1 的变化情况, 从图中可以看出 std 、 enty 和 grad 都随着 λ_1 的增大而增大, dsd1 随着 λ_1 的增大而减小, 所以需要找到 λ_1 的取值范围, 使 std 、 enty 、 grad 和 dsd1 都相对较大, 通过观察图 2(c) 可知, $\lambda_1 = 3 \sim 5$ 较好。图 2(d) 为固定 $\lambda_1 = 4$ 、 $P = 1.5$ 时, 各评价指标随着 λ_2 的变化情况, 同理通过观察图 2(d) 可知, $\lambda_2 = 6 \sim 10$ 较好。图 2(e) 为固定 $\lambda_1 = 4$ 、 $\lambda_2 = 7$ 时, 各评价指标随着 P 的变化情况, 可知 $P = 2 \sim 3$ 较好。

4 实验结果及其分析

实验一: 选取 $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.1$, $\lambda_1 = 4$, $\lambda_2 = 8$, $P = 2.5$ 对图 2(a) 和 (b) 的可见光和红外图像进行融合, 算法迭代了 54 次得到了融合图像。并与基于拉普拉斯分解、小波变换及文献 [3] 的变分融合方法 (Fang's method) 对比, 其融合结果如图 3 所示, 融合图像的评价指标结果示于表 1。



图 3 实验一融合结果。(a) 拉普拉斯方法的融合图像; (b) 小波方法的融合图像; (c) 文献 [3] 方法的融合图像; (d) 本文方法的融合图像

Fig.3 Fused results of the first experiment. (a) Fused image of LP method; (b) fused image of wavelet method; (c) fused image of Fang's method; (d) fused image of the proposed method

表 1 第一组融合图像的质量评价指标

Table 1 Quality evaluation indices of the first group of fused images

| | std | enty | grad | dsd |
|-----------------|---------|--------|--------|---------|
| LP method | 26.7633 | 6.2993 | 5.4154 | 31.6147 |
| Wavelet method | 27.5062 | 6.3367 | 6.0925 | 32.7878 |
| Fang's method | 30.3824 | 6.2902 | 5.6263 | 30.1560 |
| Proposed method | 37.4471 | 6.8410 | 8.1054 | 30.3130 |

从图 3 可以看出, 本文方法得到的融合图像中人、车等红外热目标信息突出, 屋檐上的招牌字迹也更为

清晰,所以本文方法更好地融合了可见光和红外图像的互补信息,获得了更好的视觉效果。由表1可见,本文算法融合结果的平均梯度明显高于其他三者,标准差和信息熵也大于其他算法的融合结果,这也与我们的视觉观测结果相符;光谱扭曲度仅比文献[3]略大,没有引起图像失真。这就从客观评价指标上证明了本文算法的有效性。

实验二:从对应的红外与可见光视频图像序列中,抽取一对尺寸 270 pixel×360 pixel 的图像进行实验效果验证,源图像如图 4(a)和(b)所示。从 3.3 节参数范围中选取 $\alpha=0.05$, $\beta=0.1$, $\lambda_1=5$, $\lambda_2=10$, $P=2$, 算法迭代 42 次,实验结果如图 4 所示。从图 4(f)可以看出,本文方法得到的融合结果人形目标区域的亮度最大,道路也更为清晰,具有最好的视觉效果。表 2 是图 4 中各融合结果的质量评价指标,可以看出本文算法融合结果的标准差、信息熵和平均梯度均大于其他三种方法,光谱扭曲度仅比文献[3]的略大,这与实验一的结果相同,这样也就从主观视觉效果和客观评价指标上验证了本文算法的有效性。

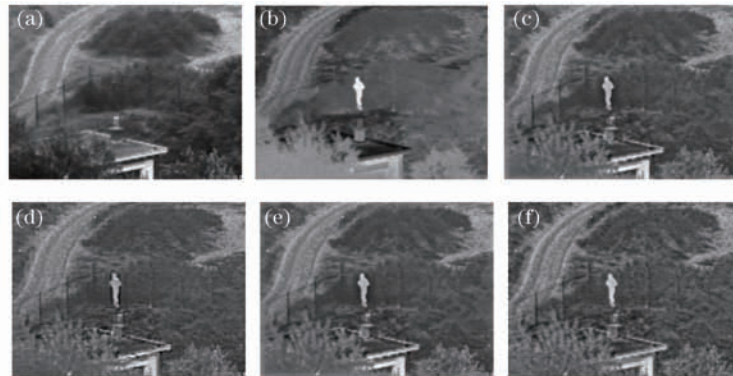


图 4 实验二融合结果。(a) 可见光图像;(b) 红外图像;(c) 拉普拉斯方法的融合图像;(d) 小波方法的融合图像;(e) 文献[3]方法的融合图像;(f) 本文方法的融合图像

Fig.4 Fused results of the second experiment. (a) Visible image; (b) infrared image; (c) fused image of LP method; (d) fused image of wavelet method; (e) fused image of Fang's method; (f) fused image of the proposed method

表 2 第二组融合图像的质量评价指标

Table 2 Quality evaluation indices of the second group of fused images

| | std | enty | grad | dsd |
|-----------------|---------|--------|--------|---------|
| LP method | 28.8329 | 6.6667 | 5.1196 | 22.7644 |
| Wavelet method | 28.9760 | 6.7410 | 5.5416 | 22.8023 |
| Fang's method | 24.7260 | 6.3339 | 4.8772 | 20.4523 |
| Proposed method | 32.1284 | 6.9001 | 7.9705 | 22.4002 |

5 结 论

提出了一种基于变分增强的红外与可见光图像融合算法,通过构建梯度增强模型,降低了噪声影响,并利用图像质量评价指标中标准差、信息熵、平均梯度和光谱扭曲度之间的制约均衡关系选择最佳的模型参数,使融合图像达到梯度最优,以便于图像后续处理。实验结果表明,本文算法针对性地增强了图像梯度特征,使融合图像具有更好的视觉效果。

参 考 文 献

- Liu Y P, Jin J, Wang Q. Novel focus region detection method for multifocus image fusion using quaternion wavelet[J]. *J Electronic Imaging*, 2013, 22(2): 023017.
- Yang Fengbao, Ni Guoqiang, Zhang Lei. Image fusion of subdivision band MWIR based on wavelet packet transform[J]. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(4): 275-279.
杨风暴,倪国强,张雷. 红外中波细分图像的小波包变换融合研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(4): 275-279.
- Faming Fang, Fang Li, Guixu Zhang. A variational method for multisource remote-sensing image fusion[J]. *International J Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2470 - 2486.
- Liu Qihai, Lin Yuchi, Feng Weichang, *et al.*. Novel different-source image fusion algorithm using lifting directionlet

- transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 358-362.
- 刘启海, 林玉池, 冯伟昌, 等. 采用提升方向波变换的异源图像融合新算法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 358-362.
- 5 Wang P G, Tian H, Zheng W. A novel image fusion method based on FRFT- NSCT[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 408232.
- 6 Liu Jiangqin. *Research on Image Fusion Method Based on Variational Partial Differential Equation*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- 刘建琴. 基于变分偏微分方程的图像融合方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- 7 Li H F, Chai Y, Li Z F. Multi-focus image fusion based on nonsubsamped contourlet transform and focused regions detection[J]. *Optik*, 2013, 124(1): 40-51.
- 8 Yi Chai, Huafeng Li, Zhaofei Li. Multifocus image fusion scheme using focused region detection and multiresolution[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(19): 4376-4389.
- 9 Diego A Socolinsky, L B Wolff. Multispectral image visualization through first-order fusion[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2002, 11(8): 923-931.
- 10 Wang Chao. *Image Processing Based on Variational Problems and Partial Differential Equations*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- 王 超. 基于变分问题和偏微分方程的图像处理技术研究[D]: 合肥: 中国科学技术大学, 2007.