

基于相位调制的可见光与红外图像融合算法

张雷¹ 张宇¹ 王肖霞²

(¹ 南阳师范学院物理与电子工程学院, 河南 南阳 473061)
(² 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要 根据实际应用中要求图像融合算法简单有效的要求, 基于对可见光图像和红外图像特征的分析, 提出了基于相位调制的图像融合算法。对可见光图像和红外图像按照通信原理中的相位调制方法进行相位调制, 通过逆变换得到融合图像。实验结果表明, 该算法在图像视觉效果、包含的信息量以及细节信息上都取得很好的效果, 融合效果优于小波变换等算法。

关键词 图像处理; 图像融合; 图像特征; 相位调制

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111005

Visible and Infrared Images Fusion Algorithm Based on Phase Modulation

Zhang Lei¹ Zhang Yu¹ Wang Xiaoxia²

¹ Physics and Electronic Engineering Collage, Nanyang Normal University,
Nanyang, Henan 473061, China

² School of Information and Communication Engineering, North University of China,
Taiyuan, Shaanxi, 030051, China

Abstract The purpose of this paper is to find a practical and effective fusion method for infrared and visible images. On the basis of analyzing the characteristics of visible and infrared images, a novel method for fusion of the infrared and the visible images based on phase modulation is proposed. Phase modulation on the visible and infrared images is conducted. Then the fusion image through inverse transformation is obtained. Experimental results show that the method discussed above is effective in visual effect, the quantity of information, and the details of information. It also shows that this new method gets a better fusion image than wavelet transform.

Key words image processing; image fusion; characteristics of image; phase modulation

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.2980

1 引言

随着传感器技术的迅速发展, 红外成像技术日趋成熟, 人们对目标的探测已经从可见光波段扩展到红外波段, 由于两个波段的图像各自拥有不同的特点, 因此可见光图像与红外图像融合成为现在图像融合热点。

目前图像融合主要分为^[1]像素级图像融合, 特征级图像融合和决策级图像融合。当前融合算法多数都属于像素级融合, 在像素级图像融合算法中像素加权平均是最简单的融合算法, 优点是提高了融合图像的信噪比, 但会造成图像的对比度的下降, 而且使图像的边缘变得模糊。为了克服其缺点, 近年来多分辨率图像融合算法得到广泛的研究, 1989年 Mallat^[2]提出快速离散小波变换, 由于小波变换具有良好的时-频局域分析特性, 在图像处理中得到了广泛应用^[3], 但是各向同性的性质导致方向选择性差, 不能有效地捕捉轮廓信息^[4]。为了解决这个问题, 提出了 Contourlet 变换, Contourlet 变换以分段二次连续曲线更有效地捕获轮廓

收稿日期: 2012-06-19; 收到修改稿日期: 2012-08-08; 网络出版日期: 2012-08-28

作者简介: 张雷(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事红外图像融合和数字信号处理等方面的研究。

E-mail: zhanglei000223@163.com

廓,变换系数的统计特性被认为类似于小波变换系数的统计特性,具有高峰度、长拖尾、聚集性和持续性^[5],此外还有有金字塔算法等^[6]。多分辨率图像融合算法能够更好的提取图像的细节信息因此取得了比较好的融合效果,但是融合算法比较复杂,计算效率较低^[7],而在实际应用当中要求算法简单而且有效。根据实际应用的要求,首先对可见光图像和红外图像进行特征特征分析,根据其不同的图像特征,采用不同的图像增强算法进行预处理,并提出基于相位调制(PM)的可见光和红外图像快速融合算法。

2 图像特征分析

在许多情况下,可见光与红外目标探测是针对地面场景的,参与融合处理的各个波段图像的量化位数(即每个像素取值的二进制位数)是相同的。在这种情况下,可见光图像主要是利用探测场景的太阳反射光,而红外图像是利用场景的热辐射,因此对于相同场景、具有相同量化位数的可见光图像(如图1所示)和红外图像(如图2所示)比较时,具有如下特点:

- 1) 可见光图像景物细节的比较清晰,而红外图像整体比较模糊;
- 2) 可见光图像只能显示能反射太阳光的景物,隐藏的目标和夜间的景物显示不出,而红外图像是利用景物的热辐射成像,因此能显示隐藏在障碍物后的目标以及景物和目标在夜间的图像^[8]。



图1 可见光图像
Fig.1 Visible image



图2 红外图像
Fig.2 Infrared image

通过对地面场景的可见光图像与红外图像的目标特征比较分析可知,对于背景比较复杂的地面目标探测,可见光图像的背景细节信息比较丰富,便于目标的定位,而对应的红外图像中,细节信息较少,不利于目标位置确定。

根据可见光图像和红外图像特征以及实时系统的要求,通过粗糙集滤波方法对红外图像进行粗糙集滤波,得到红外增强的图像,通过同态滤波有效保留提取可见光图像背景细节信息,最后采用基于PM调制的图像融合算法对增强图像进行融合。

3 图像增强

3.1 粗糙集滤波

粗糙集理论是建立在分类机制的基础上的,它将分类理解为在特定空间上的等价关系,而等价关系构成了对该空间的划分。粗糙集理论将知识理解为对数据的划分,每一被划分的集合称为概念。粗糙集理论的主要思想是利用已知的知识库,将不精确或不确定的知识用已知的知识库中的知识来(近似)刻画^[9,10]。

利用粗糙集中的近似空间概念和不可分辨关系,可以对红外图像进行如下处理:

- 1) 假设移动窗口中存在的等价关系 K 为

$$K : |f(k,l) - f(i,j)| \geq D, \quad (k,l) \in W \quad (1)$$

式中 $f(i,j)$ 为中心像素点的灰度值, D 为待处理图像可移动窗口中一个预定的等价类误差, W 为选择的处理窗口。

- 2) 在窗口 W 中,满足等价关系 K 的像素数量为 M ,则每个移动窗口的近似精度可定义为

$$\alpha_K(X) = \frac{M}{N^2}. \quad (2)$$

3) 对待处理图像进行滤波处理。

当 $f(i, j) \leq \mu(i, j)$ 时,

$$f(i, j) = \begin{cases} \mu_1(i, j), & \alpha_R(X) < T \\ M_1(i, j), & \alpha_R(X) \geq T \end{cases} \quad (3)$$

当 $f(i, j) > \mu(i, j)$ 时,

$$f(i, j) = \begin{cases} \mu_2(i, j), & \alpha_R(X) < T \\ M_2(i, j), & \alpha_R(X) \geq T \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 为定义阈值。

(3)式与(4)式中 $\mu(i, j)$ 为可移动窗 W 的均值,将 W 窗口中像素分为两个子集窗口中灰度值均大于、均小于 $\mu(i, j)$ 的所有像素的集合, $M_1(i, j)$ 、 $M_2(i, j)$ 和 $\mu_1(i, j)$ 、 $\mu_2(i, j)$ 分别为这两个子集的灰度中值和灰度均值。利用这种方法进行红外图像滤波,可以得到图像 F_b 。

3.2 可见光图像增强

可见光图像主要是利用探测场景的太阳反射光,图象的灰度由照射分量和反射分量合成。反射分量反映图象内容,随图象细节不同在空间上作快速变化,而照射分量在空间上通常均具有缓慢变化的性质。同态滤波是把频率过滤和灰度变换结合起来的一种图像处理方法,它依靠图像的照度/反射率模型作为频域处理的基础,利用压缩亮度范围和增强对比度来改善图像的质量^[11],消除了不均匀照度的影响,增强了图象细节。因此使用同态滤波可以很好的增强可见光图像的细节信息。

其滤波流程如图 3 所示。

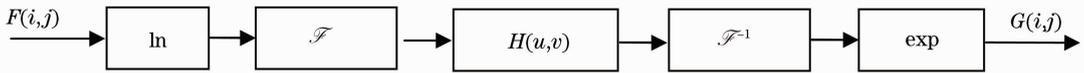


图 3 同态滤波流程图

Fig. 3 Flow chart of homomorphic filtering

其具体步骤为:

- 1) 设 $F(i, j) = s(i, j) * r(i, j)$, 其中 $s(i, j)$ 为图像的照明分量, $r(i, j)$ 为图像的反射分量;
- 2) 对 $F(i, j)$ 取对数;
- 3) 对取对数后的图像做 FFT 变换;
- 4) 选择滤波器函数 $H(u, v)$, 并对图像进行滤波处理;
- 5) 对处理后的图像做 FFT 反变换;
- 6) 对反变换后的图像去指数的到增强后的图像。

图中 $F(i, j)$ 为输入图像, $H(u, v)$ 为同态滤波器, $G(i, j)$ 为滤波后输出图像。

4 基于相位调制的融合算法

基于调制的图像融合算法通常分为对比度调制技术和灰度调制技术,基本原理是是将一幅图像做归一化处理,然后将归一化的图像与另一幅图像相乘^[12]。也有学者提出了快速互调制融合算法,直接将两幅图像进行相乘。这些基于调制的图像融合算法都可以归为无线电中的幅度调制技术,调制技术本质上就是使将载波信号随调制信号变化,使载波包含调制信号的信息,这与图像融合实际上意义相同,将红外图像加载到可见光图像中使可见光图像中包含红外图像的信息。

在无线电调制技术中除了幅度调制外还有相位调制,相位调制是用调制信号去控制高频载波的相位,使其瞬时相位在原来基础上新增随调制信号线性变化的相位分量。与调幅相比,相位调制具有抗干扰能力强的特点。可见光图像细节信息丰富,根据调相原理将可见光图像作为高频载波,红外图像中清晰目标可以作为调制信号,对调制后的信号求反变换就是融合图像。

调相的数学公式为^[13]

$$v_c = V_{cm} \cos \omega_c t, \quad (5)$$

$$v_{\Omega} = V_{\Omega m} \cos \Omega t, \quad (6)$$

$$v = V_{cm} \cos(\omega_c t + k_f \cos \Omega t), \quad (7)$$

式中 v_c 为载波信号, V_{cm} 为载波幅度, ω_c 为载波角频率, v_{Ω} 为调制信号, $V_{\Omega m}$ 为调制信号幅度, Ω 为调制信号角频率, v 为调相信号, k_f 为调相指数。

相位调制融合算法过程如下:

1) 将可见光增强图像和红外增强图像归一化

$$f_b(i, j) = \frac{F_b(i, j) - F_{bmin}}{F_{bmax} - F_{bmin}}, \quad (8)$$

$$g(i, j) = \frac{G(i, j) - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}, \quad (9)$$

式中 f_b 和 g 为归一化后的图像, F_{bmin} 为图像 F_b 最小灰度值, F_{bmax} 为图像 F_b 最大灰度值, G_{min} 为图像 G 最小灰度值, G_{max} 为图像 G 最大灰度值。

2) 根据(5)式和(6)式将归一化后的可见光图像灰度值为载波相位, 将归一化后红外图像灰度值作为调制信号相位, 则载波信号和调制信号分别为

$$v_c(i, j) = V_{cm} \cos f_b(i, j), \quad (10)$$

$$v_{\Omega}(i, j) = V_{\Omega m} \cos g(i, j), \quad (11)$$

式中 V_{cm} 和 $V_{\Omega m}$ 分别取 1。

3) 根据公式将(10)式和(11)式代入(7)式并作相应修改得

$$v(i, j) = \cos[\alpha f_b(i, j) + k_f \cos g(i, j)], \quad (12)$$

式中 $k_f = 1$, α 作为调整系数取值在 $(0, 1]$ 之间。

4) 融合结果。 $\pi/2$ 反余弦函数的取值范围为 $[0, \pi]$, 由于 $\alpha f_b(i, j) + \cos g(i, j) > 0$, 因此 $\arccos[v(i, j)]$ 取值范围在 $[0, \pi]$, 将 $\arccos v(i, j)$ 做归一化处理并转变到 $[0, 255]$ 之间得到融合后的图像

$$h(i, j) = |\arccos[v(i, j) - 1]| / v_{max} \times 255, \quad (13)$$

式中 $h(i, j)$ 为融合后的图像 (如图 4 所示), v_{max} 为 $|\arccos[v(i, j) - 1]|$ 中最大值。



图 4 本文融合图像

Fig. 4 Phase-modulation fusion image

5 融合结果分析

为了对比本文算法的有效性, 文中还使用小波变换、曲波变换和算数平均的融合算法, 如图 5~7 所示, 其中小波变换和曲波变换融合规则采取低频系数取平均的方法。图像质量评价方法按评价的主体来划分, 可以分为主观评价方法和客观评价方法两大类。主观评价方法能够反映观察者对图像的感受^[14], 客观判别方法可用定量分析的数学模型表达出人对图像的主观感受, 再经过各种数学计算得到图像质量的科学指标^[15]。



图 5 小波融合图像

Fig. 5 Wavelet fusion image



图 6 曲波变换融合图像

Fig. 6 Curvelet transform fusion image

主观上看,视觉效果曲波算法最好,小波算法次之,算数平均算法最差,算数平均融合图像整体图像对比度降低,目标较红外图像中的低,细节信息也较小波变换和曲波变换差。

本文融合图像与源图像及其它三种算法融合图像相比,整体亮度降低,视觉效果优于小波变换和算术平均算法,较曲波变换次之,算法复杂程度比小波变换和曲波变换简单,图像细节信息丰富,图像背景清晰,树木、栏杆、房屋、道路和植被都比源图像以及其它三种融合算法融合图像相对应的景物都清晰,目标的亮度有所下降,但是同背景的对比度并没有下降。因此,本文融合算法在图像细节信息和视觉效果上以及复杂程度上达到了预期效果。

从客观上来讲,对于图像融合质量的评价,现在并没有统一的标准,本文使用图像的均值、方差、熵和平均梯度来评价图像效果。均值衡量图像整体的亮度,方差表示图像的离散程度,熵表示图像的信息量,平均梯度描述图像的细节信息。表1为图像评论指标表。由表1可知,本文算法融合图像的均值最低、方差和熵以及平均梯度最大,因此本文算法图像灰度值分布更广,图像包含的信息量更大,图像的细节信息更丰富,达到预期效果。



图7 算数平均融合图像

Fig.7 Count average fusion image

表1 图像评价指标

Table 1 Image evaluation index

Image	Mean value	Variance	Entropy	Average gradient
Infrared image	120.040	36.257	6.8245	0.094715
Visible image	129.020	34.103	6.8868	0.083857
Wavelet fusion image	169.26	26.778	3.1353	0.080881
Curvelet transform fusion image	124.11	32.114	3.2415	0.11761
Count average fusion image	112.33	23.124	1.247	0.073871
Phase-modulation fusion image	58.511	43.524	7.0428	0.16368

6 结 论

在分析可见光图像和红外图像特征的基础上,提出了基于相位调制的图像融合算法,并进行了实验。实验结果表明与源图像相比本文算法融合图像亮度下降,符合人的视觉效果,同小波算法、曲波算法和算数平均算法相比图像动态范围更大,图像信息量更多,图像的细节信息更加丰富。实验结果还表明,本文算法简单有效,达到了预期要求。

参 考 文 献

- 1 F. A. Al-Wassai, N. V. Kalyankar, A. A. Al-Zuky. Arithmetic and frequency filtering methods of pixel-based image fusion techniques[J]. [2011-01-19] <http://arxiv.org/abs/1107.3348>
- 2 S. G. Mallat. A theory for multi-resolution signal decomposition; the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674~693
- 3 Cai Yixiang, Chen Wenjing, Li Sikun *et al.*. Application of two-dimensional continuous wavelet transform in demodulating fringe pattern with two frequency components[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071001
蔡义祥, 陈文静, 李思坤 等. 二维小波变换在解调双载频条纹图中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071001
- 4 Gao Bin, He Tongdi. Self-adaptive multi-sensor image fusion using curvelet transform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051003
高 斌, 何同弟. 基于 Curvelet 变换的自适应多传感器图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 051003
- 5 Niu Yanmin, Wang Xuchu. Statistical modeling of nonsubsamped Contourlet transform coefficients and its application to

- image denoising[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051005
- 牛彦敏, 王旭初. 非子采样 Contourlet 变换系数统计建模及图像去噪应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 051005
- 6 A. Tote. Image fusion by ratio of low-pass pyramid[J]. *Patter Recognition Letter*, 1989, **9**(4): 245~253
- 7 Li Yufeng, Feng Xiaoyun *et al.*. A fast multi-sensor image mutual fusion algorithm[J]. *Opto-Electronic Eegineering*, 2011, **38**(8): 117~123
- 李郁峰, 冯晓云 等. 多传感器图像互调制快速融合[J]. *光电工程*, 2011, **38**(8): 117~123
- 8 Yang Fengbao, Ni Guoqiang, Zhang Lei. Images 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. 红外中波细分波段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
- 9 Z. Pawlak. Rough set theory and its application to data analysis[J]. *Cybernetics and Systems*, 1998, **29**(9): 26~89
- 10 Pan Li, Zhang Zhuxun, Zhang Jianqing. Application of rough sets in image feature selection [J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2002, **17**(1): 23~31
- 潘 励, 张祖勋, 张剑靖. 粗集理论在图像特征选择中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2002, **17**(1): 23~31
- 11 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing Second Edition [M]. Ruan Qiuqi, Ruan Zhiyu, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
- R. C. Gonzalez, R. E. Woods. 数字图像处理, 第三版[M]. 阮秋珍, 阮宇智 译. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 12 Jing Zhongliang, Xiao Gang, Li Zhenhua. Image Fusion: Theory and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007
- 敬忠良, 肖 刚, 李振华. 图像融合 [M]. 北京: 理论与应用, 高等教育出版社, 2007
- [13 Fan Changxin. Principle of Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001
- 樊昌信. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 14 Zhao Wenzhe, Qin Shiyin. Image quality assessment and some solving approaches to current issues [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041002
- 赵文哲, 秦世引. 图像质量评价的研究进展和若干问题的解决途径[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041002
- 15 Zhang Yong, Jin Weiqi. Study of assessment effects and image fusion algorithms performance analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 101001
- 张 勇, 金伟其. 图像融合算法性能分析与评价效果研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(10): 101001