

加权多分辨率图像融合的快速算法

李光鑫¹⁾ 王珂¹⁾ 张立保²⁾

¹⁾(吉林大学通信工程学院, 长春 130025) ²⁾(北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要 快速、可靠的融合算法是图像融合技术实用化的关键,因此具有良好融合效果的快速融合算法的研究显得尤为重要。传统的加权多分辨率图像融合方法能够产生良好的融合效果,但是其计算复杂度却不能令人满意,为了降低算法的复杂度,基于定义的相关信号强度比,提出了一种加权多分辨率图像融合的快速算法。同传统加权多分辨率图像融合方法相比,算法具有较低的计算复杂度。实验结果表明,该算法同传统加权多分辨率图像融合方法一样,能够产生良好的融合效果。

关键词 快速算法 图像融合 多分辨率分析 相关信号强度比

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)12-1529-08

Computationally Efficient Algorithm of Multiresolution Image Fusion with Weighted Average Fusion Rule

LI Guang-xin¹⁾, WANG Ke¹⁾, ZHANG Li-bao²⁾

¹⁾(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

²⁾(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract The key of application and practicalization of image fusion technology is whether the used fusion algorithm has fast speed and high reliability or not, so the research of computationally efficient algorithms which can produce good results is very important. Conventional multiresolution image fusion methods with weighted average fusion rule exhibit high level of fused image quality, but their fusion rules represent computationally expensive solutions. To reduce their computational complexity, using the defined correlated signal intensity ratio, a computationally efficient algorithm of multiresolution image fusion with weighted average fusion rule is presented. Compared with those conventional methods, the proposed algorithm achieves a considerable improvement in real time capabilities. The experimental results show that images achieved by this efficient algorithm are of equivalent or better quality than those obtained from more complex, conventional image fusion methods.

Keywords efficient method, image fusion, multiresolution analysis, correlated signal intensity ratio

1 引言

图像融合是将相同或不同传感器得到的同一目标的多幅图像在统一的坐标中,利用图像融合算法合成一幅满足某种需求的新图像,得到的融合图像信息比原来任何一幅图像都更为丰富,对目标的表征也更为精确,从而更利于后续的图像处理和识别。相对于单幅图像而言,利用多幅图像的融合结果可以大大提高目标的可识别性,因此,图像融合技术在

军事、医学、遥感、计算机视觉等领域得到了广泛的应用。根据信息表征层次的不同,图像融合可分为3个层次:像素级图像融合、特征级图像融合和决策级图像融合^[1,2]。像素级图像融合是直接作用于图像像素的最底层的融合,也是应用最广泛的一种融合,本文所述的图像融合是指像素级图像融合。

近年来,多分辨率分析在图像处理领域中得到了广泛的应用,同时也被成功地应用于图像融合。多分辨率图像融合可分为多分辨率分析和融合规则两部分^[1,2]。多分辨率分析是多分辨率图像融合的

收稿日期:2004-11-28; 改回日期:2005-04-22

第一作者简介:李光鑫(1978~),男,2001年于北京理工大学自动控制系获工学学士学位,2005年于吉林大学通信工程学院获工学硕士学位,现为吉林大学通信工程学院博士研究生。主要从事图像处理、图像融合等方面的研究。E-mail:guangxin.li@126.com

关键,它的选取会对融合结果产生重要的影响,目前采用的多分辨率分析主要是金字塔分解和小波变换^[1,2];除了多分辨率分析以外,融合规则的选取也是至关重要的,恰当与否直接关系到融合图像的质量。Burt 和 Kolczynski^[3]基于窗口区域归一化互相关(local normalized correlation)和窗口区域能量(local energy),利用梯度金字塔,首先提出了一种加权融合规则,由于该方法的融合规则对图像特征信息相似时的情况进行了较为精确的处理,从而能够产生良好的融合效果,因此该融合规则在各个图像融合领域得到了广泛的应用;蒋晓瑜等人^[4]利用小波变换将该融合规则用于多光谱图像融合;同样采用小波变换,刘贵喜等人^[5]将该融合规则用于可见光与红外图像融合;王文杰等人^[6]将其用于遥感图像融合。虽然这些加权多分辨率图像融合方法能够产生良好的融合效果,但是由于其加权系数的选择和计算较为复杂,因此算法复杂度较高。针对这个问题,基于定义的相关信号强度比,提出了一种加权多分辨率图像融合的快速算法,同传统加权多分辨率图像融合方法相比,算法具有较低的计算复杂度,而且与传统加权多分辨率图像融合方法一样,算法产生的融合图像具有良好的视觉效果,从而有效地解决了融合效果和算法复杂度的矛盾。

2 算法原理

受 Zhang 和 Blum^[2]的启发,Piella^[1]提出了一个多分辨率图像融合框架,其框架对多分辨率图像融合各个部分进行了较为详细的分类和描述,为了明确地阐述算法的原理,这里引入了其框架中的一些概念。

2.1 小波多分辨率分析

利用小波变换作为多分辨率分析工具,实验中采用 Mallat^[7]提出的正交小波变换的快速算法。文中用 C_j 表示低频小波系数,是图像在 2^j 分辨率上的近似分量,用 $D_j^{(\varepsilon)}$ ($\varepsilon = 1, 2, 3$) 表示高频小波系数,是图像在 2^j 分辨率上的细节分量,其中 $D_j^{(1)}$ 对应于垂直方向上的细节分量, $D_j^{(2)}$ 对应于水平方向上的细节分量, $D_j^{(3)}$ 则对应于对角方向上的细节分量。

2.2 匹配测度

匹配测度^[1](match measure)用以表示输入图像多分辨率分析系数之间的相似程度,用定义的相关信号强度比 $R_{j,AB}^{(\varepsilon)}$ (correlated signal intensity ratio)

作为匹配测度,其表达式如下:

$$R_{j,AB}^{(\varepsilon)} = \frac{I_{j,A}^{(\varepsilon)}}{I_{j,B}^{(\varepsilon)}} \quad (1)$$

其中, $I_{j,S}^{(\varepsilon)}(m,n) = \sum_{m'=1, \dots, L} \sum_{n'=1, \dots, K} P(m',n') |D_{j,S}^{(\varepsilon)}(m+m',n+n')|$, $D_{j,S}^{(\varepsilon)}$ 是输入图像 $S(S=A, B)$ 的细节分量, $I_{j,S}^{(\varepsilon)}$ 表示 S 在 2^j 分辨率下, ε 方向上的窗口区域信号强度,这样相关信号强度比 $R_{j,AB}^{(\varepsilon)}$ 表示的就是窗口区域内 $D_{j,A}^{(\varepsilon)}$ 和 $D_{j,B}^{(\varepsilon)}$ 的信号强度比。 m, n 是像素坐标, P 为窗口区域的掩模,用于对 $|D_{j,S}^{(\varepsilon)}|$ 进行线性滤波, L 和 K 定义了掩模区域的大小, m', n' 的变化范围在 L, K 内。

如果 $R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n)$ 接近于 1, 就表示 $D_{j,A}^{(\varepsilon)}$ 和 $D_{j,B}^{(\varepsilon)}$ 的窗口区域信号强度相近,这样就可以认为在相应的区域内 $D_{j,A}^{(\varepsilon)}$ 和 $D_{j,B}^{(\varepsilon)}$ 具有某种相似性,否则就认为两者存在较大的差异,因此本文定义的相关信号强度比可以表示输入图像细节分量间的相似程度。活性测度^[1](activity measure)能够提取输入图像多分辨率分析系数的某种特征信息,从而用于比较哪幅输入图像的特征信息更为明显,相关信号强度比提取出了输入图像窗口区域信号强度这个特征信息,而且计算出其比例关系,根据其数值可直接判断哪幅输入图像的特征信息更为显著,因此合理地设定相关信号强度比的阈值范围,作为匹配测度的相关信号强度比也会起到活性测度的作用,这样相关信号强度比实质上就是匹配测度和活性测度的结合体。

2.3 系数择取

系数择取^[1](decision map)是融合算法的核心,其输出量择取因子^[1](decision)控制着输入图像多分辨率分析系数的合成。择取因子 d 的具体取法如下:

$$d_j^{(\varepsilon)}(m,n) = \begin{cases} 1 & \text{当 } R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) \geq \frac{1}{T} \\ 0 & \text{当 } R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) < T \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\frac{1 - R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n)}{1 - 1/T} \right] & \text{当 } 1 \leq R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) < \frac{1}{T} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[\frac{1 - R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n)}{1 - T} \right] & \text{当 } T \leq R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) < 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, T 为阈值,取值范围为 $[0, 1]$ 。在以 (m, n) 为中心的窗口区域内,如果细节分量 $D_{j,A}^{(\varepsilon)}$ 和 $D_{j,B}^{(\varepsilon)}$ 存在较大差异,即 $R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) \geq 1/T$ 或 $R_{j,AB}^{(\varepsilon)}(m,n) < T$, 择取因子 $d_j^{(\varepsilon)}(m,n)$ 就取 0 或 1,反之,则取一个 0 到 1 的值。实际中阈值 T 取常数,那么式(2)实质上就是择取因子 d 和相关信号强度比 R 之间的函

数 $d(R)$, 根据式(2)可以看出 $d(R)$ 为分段函数, d 的最大值为 1, 最小值为 0, 分别表示只取图像 A 或只取图像 B 的细节分量作为融合图像的细节分量, d 取 0 到 1 的值, 则表示各取图像 A, B 的一部分作为融合图像的细节分量。

加权多分辨率图像融合的思想就是在两幅图像细节分量的某种测度相近时, 就各提取细节分量的一部分作为融合图像的细节分量。测度相近说明两幅图像细节分量具有一定的相似性, 均存在有用的信息, 应都纳入融合图像当中; 反之测度差异较大时, 说明只有一幅图像细节分量存在有用信息, 因此就只提取一幅图像的细节分量作为融合图像的细节分量。相关信号强度比 R 这一比例关系反映的是两幅图像细节分量窗口区域信号强度 I 的差异, 可以根据这个比例关系的大小来确定两幅图像窗口区域内细节分量 D 是否具有相似性, 图像的窗口区域信号强度 I 越小说明相应的窗口区域内细节分量 D 提供的有用信息就越少。这样根据以上思想, 式(2)的简单推导如下:

当 $I_A < I_B$ 时, 若 $I_A > \alpha I_B$ (即 $\alpha < R < 1$, 其中 $0 < \alpha < 1$), 则认为 I_A, I_B 两者相近, 说明 D_A 和 D_B 具有一定的相似性, 此时应各取 D_A 和 D_B 的一部分作为融合图像的细节分量, 且由于 $I_A < I_B, D_A$ 应取得少些, 即 d 应取小于 0.5 的值; 若 $I_A < \alpha I_B$ (即 $R < \alpha$), 则认为 I_A, I_B 两者相差较大, 且由于 $I_A < I_B$, 说明 D_A 提供的有用信息很少, 应只取 D_B , 即 $d = 0$ 。 $R = \alpha$ 为分段点, $d(\alpha) = 0$ 。

同理, 当 $I_A > I_B$ 时, 若 $I_A < \beta I_B$ (即 $1 < R < \beta$, 其中 $\beta > 1$), 则认为 I_A, I_B 两者相近, 说明 D_A 和 D_B 具有一定的相似性, 此时应各取 D_A 和 D_B 的一部分作为融合图像的细节分量, 且由于 $I_A > I_B, D_B$ 应取得少些, 即 d 应取大于 0.5 的值; 若 $I_A > \beta I_B$ (即 $R > \beta$), 则认为 I_A, I_B 两者相差较大, 且由于 $I_A > I_B$, 说明 D_B 提供的有用信息很少, 应只取 D_A , 即 $d = 1$ 。 $R = \beta$ 为分段点, $d(\beta) = 1$ 。

由于 D_A, D_B 的互易性, 应该有 $\alpha\beta = 1$ 。同时函数 $d(R)$ 存在一个固定点, 即 $R = 1$ 时, $d = 0.5$, 也就是当 $I_A = I_B$ 时, 应各取 D_A, D_B 的一半作为融合图像的细节分量, 这也符合上述加权多分辨率图像融合的思想。

通过以上的分析可知函数 $d(R)$ 有 3 个已知点: $M_1(R_1, d_1) = (\alpha, 0), M_2(R_2, d_2) = (1, 0.5), M_3(R_3, d_3) = (\beta, 1)$ 。为了减少计算量, 分别利用 M_1, M_2 和 M_2, M_3 进行拉格朗日线性插值, 而且由于

$\alpha\beta = 1$, 因此若设 $\alpha = T$ (其中 $0 < T < 1$), 则有 $\beta = 1/T$, 这样相应的线性插值结果如下:

当 $\alpha < R < 1$ 时, 有

$$d(R) = \frac{R - R_2}{R_1 - R_2}d_1 + \frac{R - R_1}{R_2 - R_1}d_2$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - R}{1 - \alpha} \right)$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - R}{1 - T} \right) \tag{3}$$

当 $1 < R < \beta$ 时, 有

$$d(R) = \frac{R - R_3}{R_2 - R_3}d_2 + \frac{R - R_2}{R_3 - R_2}d_3$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1 - R}{1 - \beta} \right)$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1 - R}{1 - 1/T} \right) \tag{4}$$

利用线性插值得到的 $d(R)$ 函数为分段函数, 其函数曲线示意图如图 1 所示。那么综合上面的分析, 再经过整理就可以得到式(2), 此外还要调整函数分段点 $\alpha = T, \beta = 1/T$ 在定义域的所属范围, 以确保函数的连续性。另外, 在实际中阈值 T 可以取到 0 和 1, 当阈值 T 取 0 时, $1/T$ 取系统最大的浮点数。

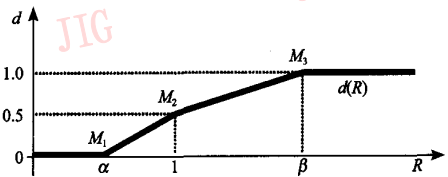


图 1 $d(R)$ 函数曲线示意图

Fig. 1 The sketch curve of function $d(R)$

2.4 系数合成

系数合成^[1] (combination map) 是指对输入图像的多分辨率分析系数进行合并, 从而得到融合图像的多分辨率分析系数。利用加权平均法来进行系数合成, 这样择取因子 d 实质就是相应的多分辨率分析系数 D_s 的权值 w_s , 其表达式如下:

$$D_{j,F}^{(e)}(m, n) = w_{j,A}^{(e)}(m, n)D_{j,A}^{(e)}(m, n) + w_{j,B}^{(e)}(m, n)D_{j,B}^{(e)}(m, n) \tag{5}$$

其中, $w_{j,A}^{(e)}(m, n) = 1 - w_{j,B}^{(e)}(m, n) = d_j^{(e)}(m, n)$, $D_{j,F}^{(e)}$ 为融合图像 F 的小波高频系数, $w_{j,S}^{(e)}$ 为 $D_{j,S}^{(e)}$ 对应的权值。

2.5 算法的步骤

本文融合算法的步骤总结如下:

(1)对输入图像进行小波分解,建立各自的多分辨图像序列。

(2)首先用式(1)分别计算输入图像各自细节分量的匹配测度,然后用式(2)得到择取因子,最后用式(5)式得到融合图像的细节分量。

(3)在最低分辨率时,对输入图像的近似分量进行算术平均,从而得到融合图像的近似分量。

(4)用融合图像的近似分量和细节分量,通过小波逆变换得到最后的融合图像。

3 实验

实验中选取两组图像作为图像源,一组是由一幅清晰的图像“Clock”作为标准参考图像(图 2(a)),大小为 512 × 512),在该图像中选取两个不同的聚焦点,分别进行高斯模糊化,人工地生成两幅多聚焦图像(图 2(b)和图 2(c));另一组是同一场景的可

见光和红外图像(图 3,大小为 480 × 640)。实验均采用 Daubechies^[8]的‘db8’小波,分解层数为 3。

3.1 融合结果的客观评价

如果图像源存在标准的参考图像(如图 2(b)和图 2(c)),则利用均方根误差^[1](RMSE)作为其融合结果的客观评价指标,其定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [G(m,n) - F(m,n)]^2}{M \times N}} \quad (6)$$

其中,G 为标准的参考图像,F 为融合后的图像,M, N 分别为图像的行数和列数, RMSE 值越小,说明融合效果越好。

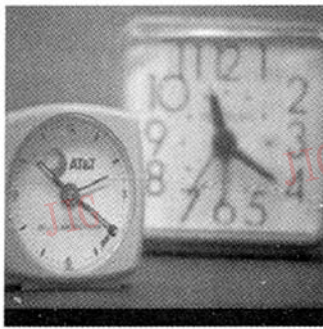
如果图像源没有参考图像(如图 3),则用 Piella^[6]提出的边缘融合质量指标(EFQI)作为其融合结果的客观评价指标,其定义如下:

$$Q_E(A,B,F) = Q_w(A,B,F)^{1-\alpha} \cdot Q_w(A',B',F')^\alpha \quad (7)$$

其中, Q_E 为 EFQI, Q_w 为加权融合质量测度^[9], A' 、



(a) 标准的参考图像



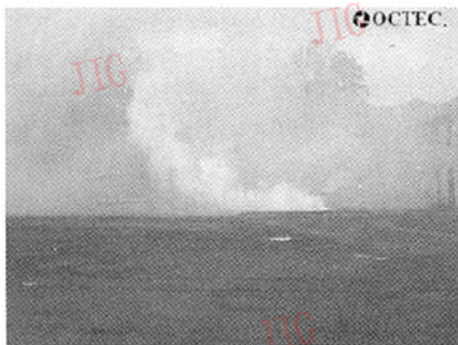
(b) 聚焦在左边的图像



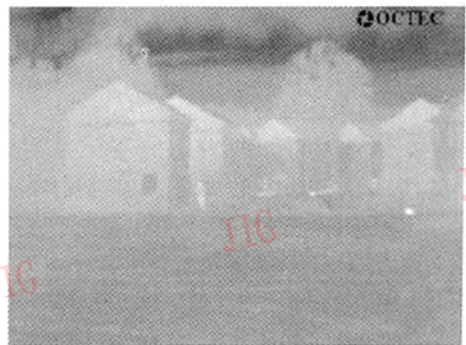
(c) 聚焦在右边的图像

图 2 Clock 标准参考图像和多聚焦图像

Fig. 2 The “Clock” reference image and multi-focus images



(a) 可见光图像



(b) 红外图像

图 3 可见光和红外图像

Fig. 3 Visual and IR images

B' 、 F' 分别为输入图像 A 、 B , 融合图像 F 的边缘图像, α 取 0.5, EFQI 值越大, 说明融合效果越好。

3.2 掩模和阈值对融合结果的影响

选取不同的掩模系数和阈值对实验图像进行融合, 融合结果的客观评价如表 1、表 2 所示, 表中掩模的大小均为 3×3 , 其中, P_M 为均值滤波器, 即

$\{\{1/9, 1/9, 1/9\}, \{1/9, 1/9, 1/9\}, \{1/9, 1/9, 1/9\}\}$, P_L 为归一化的低通滤波器, 即 $\{\{1/10, 1/10, 1/10\}, \{1/10, 1/5, 1/10\}, \{1/10, 1/10, 1/10\}\}$, P_H 为归一化的高通滤波器, 即 $\{\{-1, -1, -1\}, \{-1, 9, -1\}, \{-1, -1, -1\}\}$ 。

表 1 不同掩模系数和阈值时多聚焦图像融合结果的 RMSE

Tab.1 RMSE for fusion results of multi-focus images with different mask coefficients and thresholds

	阈值									
	0.00	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
P_M	4.8963	2.8945	2.6928	2.6351	2.6234	2.6205	2.6192	2.6182	2.6188	2.6210
P_L	4.8949	2.8607	2.6772	2.6314	2.6229	2.6198	2.6183	2.6174	2.6182	2.6206
P_H	6.2116	5.2615	5.2287	5.2197	5.2187	5.2215	5.2260	5.2320	5.2381	5.2424

表 2 不同掩模系数和阈值时可见光与红外图像融合结果的 EFQI

Tab.2 EFQI for fusion results of visual and IR images with different mask coefficients and thresholds

	阈值									
	0.00	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
P_M	0.7758	0.8383	0.8512	0.8588	0.8612	0.8618	0.8618	0.8615	0.8609	0.8603
P_L	0.7762	0.8410	0.8533	0.8603	0.8623	0.8627	0.8626	0.8622	0.8616	0.8610
P_H	0.7333	0.7721	0.7777	0.7811	0.7824	0.7828	0.7830	0.7828	0.7827	0.7825

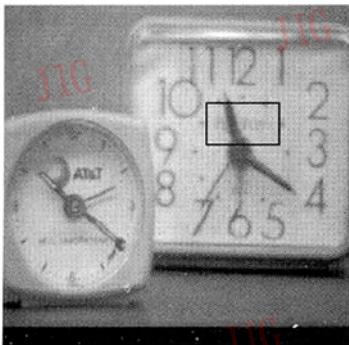
根据表 1、表 2 的实验数据以及融合效果, 可以得出以下结论:

(1) 掩模采用高通滤波器时算法的融合结果较差, 采用均值和低通滤波器时的融合结果较好。

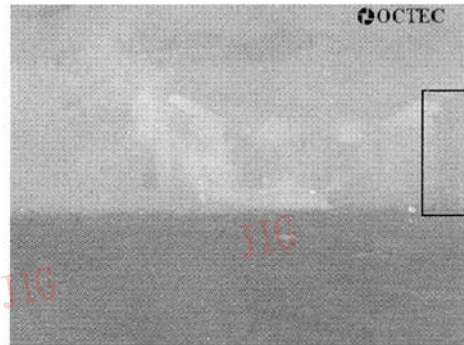
(2) 在一定范围内, 算法采用大阈值(如 0.50 ~ 1.00)的融合结果要优于采用小阈值(如 0 ~ 0.50)的融合结果, 算法的阈值不是取得越大越好, 实验图像不同, 算法的最优阈值也不同。对于实验所用的

图像和参数, 图像源为多聚焦图像时阈值取 0.80, 为可见光和红外图像时阈值取 0.60 的融合结果最优, 综合分析其实验数据, 阈值取 0.6 ~ 0.8 时算法的融合结果较好。

(3) 如果掩模选取高通滤波器, 阈值选取过小, 则融合图像会出现严重失真(如图 4(a)黑框中的字, 图 4(b)黑框中楼的窗户和门都无法看清), 同时融合图像也存在着较大的模糊和混叠现象。



(a) 多聚焦图像的融合结果



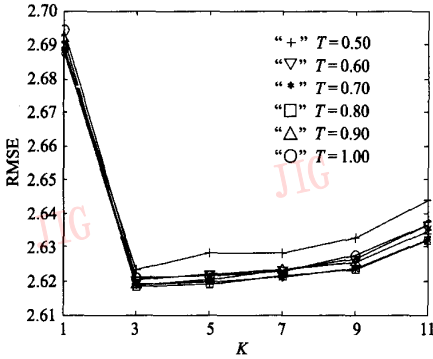
(b) 可见光和红外图像的融合结果

图 4 阈值 T 为 0, 掩模 P 取 P_H 时本文方法融合结果的图像

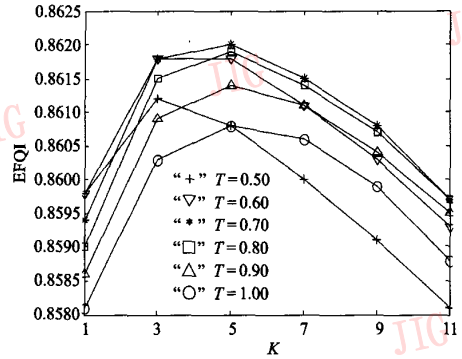
Fig.4 Fused images using the proposed method when threshold T is 0 and mask P is P_H

此外,算法所采用掩模大小也会对融合结果产生影响。选取均值滤波器作为掩模,以不同的掩模大小和阈值对实验图像进行融合,融合结果如图 5 所示。由实验数据可以看出,掩模选取的太大(如

9×9 和 11×11)或太小(如 1×1)所产生的融合结果反而不好,权衡考虑融合结果和计算量,掩模大小取 3×3 较为合适。



(a) 多聚焦图像融合结果的 RMSE



(b) 可见光与红外图像融合结果的 EFQI

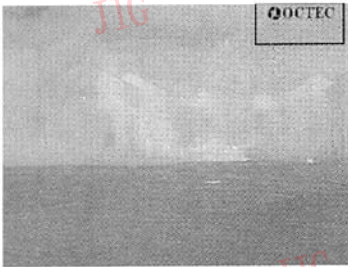
图 5 不同掩模大小($K \times K$)和阈值时本文方法的融合结果

Fig. 5 Fusion results using the proposed method with different mask sizes($K \times K$) and thresholds

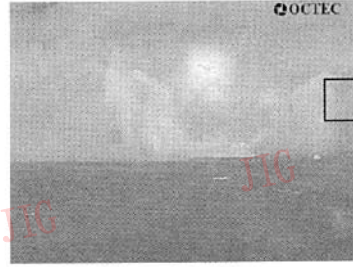
3.3 与传统加权多分辨率图像融合方法的比较

将本文方法同传统加权多分辨率图像融合方法的融合规则进行比较,为了说明加权多分辨率图像融合方法能够产生良好的融合效果,实验中将其融合规则与一些取大多分辨率图像融合方法(文献[10]方法,文献[11]方法,这些方法均采用取大融

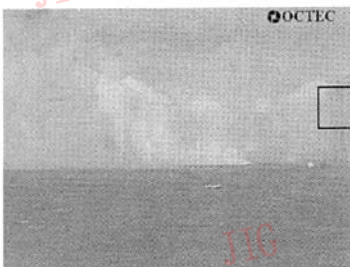
合规则,但所用的活性测度不一样)的融合规则进行了比较,由于各个传统加权多分辨率图像融合方法的融合规则相近,因此仅以文献[5]方法为代表,实验中文献[5]方法和本文方法的掩模均取 P_L , 阈值均取 0.7。各种方法的融合效果如图 6 所示。



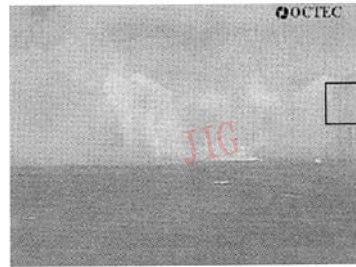
(a) 文献[7]方法的融合结果



(b) 文献[8]方法的融合结果



(c) 阈值为 0.7,掩模取 P_L 时文献[5]方法的融合结果



(d) 阈值为 0.7,掩模取 P_L 时本文方法的融合结果

图 6 对于可见光和红外图像,各种方法融合结果的图像

Fig. 6 Fused images for visual and IR images by various methods

对于多聚焦图像,由于各方法的融合效果区别不明显,因此其融合图像文中不表,融合结果的客观评价如表 3、表 4 所示。

表 3 对于多聚焦图像,各种方法融合结果的 RMSE
Tab. 3 RMSE for fusion results of multi-focus images by various methods

文献[7]方法	文献[8]方法	文献[9]方法	本文方法
2.6924	2.7143	2.6270	2.6183

表 4 对于可见光与红外图像,各种方法融合结果的 EFQI
Tab. 4 EFQI for fusion results of visual and IR images by various methods

文献[7]方法	文献[8]方法	文献[9]方法	本文方法
0.8160	0.8564	0.8601	0.8626

根据实验结果可以得出以下结论:

(1) 加权多分辨率图像融合法的融合效果好于用于比较的取大多分辨率图像融合法(如图 6(b)黑框中的窗户无法看清,而图 6(c),(d)黑框中的窗户就非常明显),相对于加权多分辨率图像融合法,取大多分辨率图像融合法的融合图像存在较为明显的混叠现象(如图 6(a)黑框中“OCTEC”字的周围存在明显的混叠现象)。

(2) 本文方法能够取得与传统加权多分辨率图像融合法相近的融合结果,而且本文方法的算法复杂度更低。若采用掩模大小为 $n \times n$,则对于一个像素点,本文方法和文献[9]方法进行系数择取的算法复杂度如表 5 所示。同传统加权融合规则相比,本文方法的融合规则有效地减少了乘法和除法运算,从而使算法的复杂度更低,提高了效率,这是由于较之于传统加权融合规则,本文方法的融合规则减少了对活性测度的计算(文献[9]方法采用窗口区域能量作为活性测度),并且由于采用相关信号强度比作为匹配测度(文献[9]方法采用窗口区域归一化互相关),因此匹配测度的计算更为简单,这

表 5 两种加权融合规则算法复杂度的比较

Tab. 5 Comparison of algorithm complexity between two weighted average fusion rules

	融合规则	
	文献[9]方法	本文方法
乘法运算次数	$6n^2 + 1$	$2n^2 + 1$
加法运算次数	$3n^2 - 2$	$2n^2 - 2$

样大大简化了系数择取的过程,从而使本文方法具有更低的算法复杂度,而且由于保持了对输入图像特征相似时的精确处理,本文方法的融合图像同传统加权多分辨率图像融合方法的融合图像一样具有良好的视觉效果。而取大多分辨率图像融合法虽然具有较低的计算复杂度,但正如前面分析,其融合图像的视觉效果较差。

(3) 掩模和阈值两个参数在很大的范围内,本文方法都能取得良好的融合结果,这保证了算法参数在实际应用中的可调性,同时说明了本文方法具有较好的可靠性。对于所用的实验图像和参数,本文方法能够取得优于其他方法的情形用黑体在表 1、表 2 中标注了出来。

4 结 论

用定义的相关信号强度比作为匹配测度,提出了一种加权多分辨率图像融合的快速算法。由于相关信号强度比同时起到了匹配测度和活性测度的作用,因此相对于传统加权多分辨率图像融合方法,本文方法具有更低的算法复杂度,并且由于对输入图像特征相似时进行了精确处理,本文方法同传统加权多分辨率图像融合方法一样,产生的融合图像具有良好的视觉效果。这样本文方法可以其较低的计算复杂度,良好的融合质量,在实际的实时系统中得到应用,而且本文方法可广泛地应用于医学、遥感、机器视觉等诸多领域。

在采用的多分辨率分析一定的情况下,算法掩模和阈值两个参数的选取会对融合结果产生影响,本文方法的参数具有较大的可调性,从而保证了算法在实际应用中的可靠性。算法所采用的多分辨率分析参数(如小波基、小波分解的层数、小波滤波器的长度)也是影响最终融合结果的因素,在实际的应用中,要根据不同的图像和需求来选取,力求取得更好的融合效果。

作为像素级图像融合方法,不管是加权多分辨率图像融合法还是取大多分辨率图像融合方法,其融合后图像内目标的信息都会有不同程度的丢失(如图 6 中所有可见光与红外融合图像中的目标(人和楼)相比于红外图像其突出性都有所减弱),采用基于边缘提取,图像分割的多分辨率图像融合方法可能是解决此问题的途径^[11,12],这方面的工作还有待进一步研究。

致谢 本文的红外和可见光实验源图像由 Octec 公司提供,在此表示感谢!

参考文献 (References)

- 1 Piella G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions [J]. Elsevier Science, Information Fusion, 2003, 4(4): 259 ~ 280.
- 2 Zhang Zhong, Blum R S. A categorization and study of multiscale-decomposition - based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(8): 1315 ~ 1326.
- 3 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion [A]. In: Proceedings of IEEE 4th International Conference on Computer Vision [C], Berlin, Germany, 1993; 173 ~ 182.
- 4 JIANG Xiao-yu, GAO Ya-yun, ZHOU Li-wei. Multispectral image fusion using wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(8): 105 ~ 108. [蒋晓瑜, 高雅允, 周立伟. 小波变换在多光谱图像融合中的应用 [J]. 电子学报, 1997, 25(8): 105 ~ 108.]
- 5 LIU Gui-xi, YANG Wan-hai. Image fusion scheme of pixel-level and multi-operator for infrared and visible light images [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 20(3): 207 ~ 210. [刘贵喜, 杨万海. 一种像素级多算子红外与可见光图像融合方法 [J]. 红外与毫米学报, 2001, 20(3): 207 ~ 210.]
- 6 WANG Wen-jie, TANG Ping, ZHU Chong-guang. A wavelet transform-based image fusion method [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11): 1130 ~ 1135. [王文杰, 唐婷, 朱重光. 一种基于小波变换的图象融合算法 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11): 1130 ~ 1135.]
- 7 Mallat S G. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. San Diego, California: Academic Press, 1998.
- 8 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- 9 Piella G. New quality measures for image fusion [A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion (Fusion 2004) [C], Stockholm, Sweden, 2004; 542 ~ 546.
- 10 Pu Tian, Ni Guo-qiang. Contrast-based image fusion using the discrete wavelet transform [J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2075 ~ 2082.
- 11 HONG Jing-yun, ZHANG Gui-lin, HONG Han-yu, *et al.* Image fusion algorithm based on high frequency channel [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(5): 509 ~ 512. [洪靖云, 张桂林, 洪汉玉等. 基于高频通道的图像融合算法 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 509 ~ 512.]
- 12 Petrović V. Multilevel image fusion [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5099: 87 ~ 96.