

文章编号:1001-5078(2007)02-0189-05

小波图像融合的最佳参数研究

赵大鹏, 时家明

(解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:为了选择一种在复杂条件下能取得较好效果的小波图像融合方法,文中对一些小波基和小波分解层数进行了比较。使用了基于区域的图像融合规则,同时通过量度融合图像的熵和标准差,进行多传感器图像融合效果的评价,通过对四类图像的融合实验,筛选出最佳的小波基和其分解层数。实验表明 bior3.9 是图像融合时的最佳小波基。

关键词:图像融合;评价准则;融合性能;互信息量

中图分类号:TP751

文献标识码:A

Study on the Optimal Parameters of Image Fusion Based on Wavelet Transform

ZHAO Da-peng, SHI Jia-ming

(Electronic Engineering Institute, PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to choose a good wavelet image fusion method in complicated conditions, some wavelet types and levels are analyzed and compared in this paper. Based on the region fusing rule, through calculating the entropy and the standard deviation of fused images, the fusion performances are evaluated. The optimal type and level of wavelet is selected by the experiments of four sorts of images. The experiments show that bior3.9 is the best wavelet in image fusion.

Key words: image fusion; evaluation criterion; fusion performance; mutual information

1 引言

所谓图像融合是指综合两个或多个源图像的信息,以获取对同一场景的更为精确、更为全面、更为可靠的图像描述^[1]。图像融合的结果是获得更适合人的视觉观察,或计算机处理的一幅图像,如计算机的辅助目标检测、目标识别等^[2]。图像融合可分为三个层次:像素级融合、特征级融合、决策级融合,其中像素级融合是最低层次的融合,它保留了尽可能多的图像信息,精度比较高,因而倍受人们的重视。

目前,像素级的图像融合方法大致可分为三大类:简单的图像融合方法、基于塔形分解(如拉普拉斯塔形分解、比率塔等)的图像融合方法和基于小波变换的图像融合方法。小波变换是图像的多尺

度、多分辨率分解,它可以聚焦到图像的任意细节,被称为数学上的显微镜。采用小波变换进行图像融合是现在研究的热点,但是关于选择什么样的小波基以及什么样的小波分解层数最好,还没有一致的结论,由此,本文进行了较全面的分析,并得出了一些有益的结果。

通过研究基于小波变换的图像融合方法,本文采用基于区域特性量测的融合算子和基于信息熵和标准差的融合效果评价准则,对不同分解层数和不同小波基下的小波融合效果进行了细致深入的讨

作者简介:赵大鹏(1979-),男,博士在读,主要研究方向为光电信息处理。E-mail:zhaodapeng@126.com

收稿日期:2006-07-05

论,分析与计算的结果表明小波分解层数和小波基的选择对小波融合效果都有很大影响。综合各种因素,bior3.9是图像融合时的最佳小波基。

2 基于小波变换的图像融合方法

基于小波变换进行图像融合的基本原理如图1所示。首先对待融合图像进行小波分解,得到图像的低频分量(近似内容)和低频分量(细节内容),然后对低频分量和高频分量分别采用相应的融合规则进行处理,得到融合图像的低频和高频分量,最后通过小波重构运算得到融合后的图像。

在图像融合过程中,小波基的种类和小波分解的层数对融合效果有很大的影响,对特定的图像来说,哪一种小波基的融合效果最好,分解到哪一层最合适,都是需要考虑的问题。为此可以通过引入融合效果的评价来构成一个闭环系统。

如图2所示,在经过与图1类似的图像融合后,接着对融合图像的融合效果进行评价,然后改变小波分解的分解层数和小波基的种类,最后使用融合效果最好的小波参数进行后续图像的融合处理。

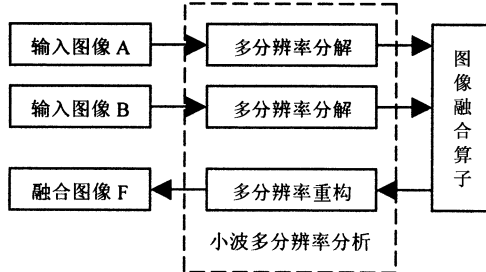


图1 基于小波变换的图像融合的基本原理

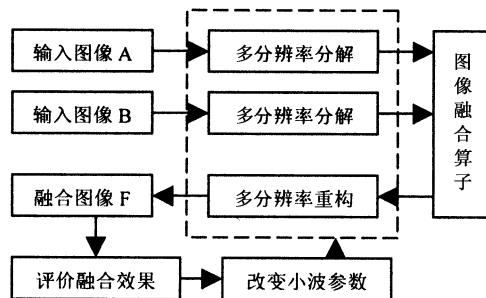


图2 基于效果评价的图像融合原理

在基于小波变换进行图像融合的算法中,通常使用 Mallat 算法进行多分辨率分析的分解和重构,该算法在小波变换中的作用如同傅里叶变换中的FFT。如果 $f(x,y)$ 表示一幅图像,则它的小波变换以离散形式出现。设尺度函数和小波函数对应的滤波器系数矩阵分别为 H 与 G 。原始图像 $f(x,y)$ 记

为 C_0 ,则二维小波分解算法可描述为:

$$\begin{cases} C_{l+1} = HC_l H' \\ D_{l+1}^h = GC_l H' \\ D_{l+1}^v = HC_l G' \\ D_{l+1}^d = GC_l G' \end{cases}, l=0,1,\dots,L-1 \quad (1)$$

式中, L 表示分解层数; h, v, d 分别表示水平、垂直、对角分量; H' 和 G' 分别是 H 和 G 的共轭转置矩阵。相应的小波重构算法为:

$$C_{l+1} = H' C_l H + G' D_l^h H + H' D_l^v G + G' D_l^d G, \quad (l=0,1,\dots,L-1) \quad (2)$$

按照 Mallat 算法,图像经小波分解后分别得到图像的低频分量、水平高频分量、垂直高频分量、对角高频分量。

3 图像的融合规则

从图1中可以看出,在图像融合过程中,融合规则扮演了一个重要的角色,如何选取融合的小波系数至关重要。目前小波域的融合规则主要分为两种:基于单个像素的和基于区域特征的融合规则。前者主要包括:(1)小波系数的直接替换或追加;(2)最大值选取;(3)加权平均等。后者主要包括:(1)基于梯度的方法;(2)基于局域方差的方法;(3)基于局域能量的方法等。

基于像素的融合规则在融合处理时表现出对边缘的高度敏感性,使得在预处理时要求图像是严格对准的,否则处理结果将不尽人意,这就加大了预处理的难度。基于区域的融合规则由于考虑了与相邻像素间的相关性,降低了对边缘的敏感性^[4],所以具有更加广泛的适用性。

为了获得视觉特性更佳、细节更丰富的融合效果,本文采用了基于区域的融合方法。根据文献[5]可知,这种融合规则所获得的图像效果最好。该融合规则及融合算子的确定方法如下:

1)分别计算两幅图像各个小波系数的局部区域“能量”

$$\begin{cases} E_{i,A}(n,m) = \sum_{n',m' \in \Omega} w^i(n',m') [L_{i,A}(n+n',m+m')]^2 \\ E_{i,B}(n,m) = \sum_{n',m' \in \Omega} w^i(n',m') [L_{i,B}(n+n',m+m')]^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L_{i,A}$ 和 $L_{i,B}$ 分别表示两幅图像第 i 个小波分解系数; $E_{i,A}(n,m)$ 和 $E_{i,B}(n,m)$ 分别表示第 i 个分解系数在以 (n,m) 为中心位置的局部区域上的能量; $w^i(n',m')$ 为与第 i 个分解系数对应的权系数; j,k

定义了局部区域的大小,本文将其取为 3×3 的区域; n', m' 的变化范围在 j, k 内。

2) 计算两幅图像局部区域的匹配度

$$M_{i,AB}(n, m) = \frac{2 \sum_{n', m'} w^i(n', m') L_{i,A}(n + n', m + m') L_{i,B}(n + n', m + m')}{E_{i,A}(n, m) + E_{i,B}(n, m)} \quad (4)$$

3) 确定融合算子

先定义一匹配度阈值 T (一般取 $0.5 \sim 1$), 然后据此进行判断, 若 $M_{i,AB}(n, m) < T$, 则:

$$\begin{cases} \text{当 } E_{i,A}(n, m) \geq E_{i,B}(n, m) \text{ 时, } L_{i,F}(n, m) = L_{i,A}(n, m) \\ \text{当 } E_{i,A}(n, m) < E_{i,B}(n, m) \text{ 时, } L_{i,F}(n, m) = L_{i,B}(n, m) \end{cases} \quad (5)$$

如果 $M_{i,AB}(n, m) \geq T$, 则:

$$\begin{cases} \text{当 } E_{i,A}(n, m) \geq E_{i,B}(n, m) \text{ 时, } L_{i,F}(n, m) = \\ W_{i,\max}(n, m) L_{i,A}(n, m) + W_{i,\min}(n, m) L_{i,B}(n, m) \\ \text{当 } E_{i,A}(n, m) < E_{i,B}(n, m) \text{ 时, } L_{i,F}(n, m) = \\ W_{i,\min}(n, m) L_{i,A}(n, m) + W_{i,\max}(n, m) L_{i,B}(n, m) \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} W_{i,\min}(n, m) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[\frac{1 - M_{i,AB}(n, m)}{1 - T} \right] \\ W_{i,\max}(n, m) = 1 - W_{i,\min}(n, m) \end{cases}$$

以上的 $L_{i,F}$ 表示融合图像的第 i 个小波分解系数。

从上面的算法可以看出, 当两图像 A, B 对应局部区域间的匹配度小于阈值 T 时, 说明两图像在该区域上的“能量”差别较大, 此时选择“能量”大的区域的中心像素作为融合后图像在该区域上的中心像素; 反之, 当两图像 A, B 对应局部区域间的匹配度大于或等于阈值 T 时, 说明两图像在该区域上的“能量”相近 (差别不大), 此时采用加权融合算子确定融合后图像在该区域上的中心像素的对比度值或灰度值。

由于局域能量较大的中心像素代表了原始图像中的明显特征, 同时, 图像的局部特征一般不只取决于某一像素, 因此, 这里采用的基于区域特性量测的加权融合算子相对于仅根据单一独立像素的简单选择或简单加权来确定融合像素的方法来说, 显得更合理、更科学。实验也证明采用该融合算子取得了良好的视觉效果及融合质量, 而且, 该融合算子用于含噪声图像的融合时也明显优于简单的像素选择算子。

4 融合图像的效果评价

如何评价融合效果, 即如何评价融合图像的质

量, 是图像融合的一个重要步骤, 但目前还缺乏一种对融合效果进行系统、全面的评价方法。目前的融合效果评价中, 主要采用以下参量进行图像融合效果的评价。

1) 熵

熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少, 图像的熵定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log p_i \quad (7)$$

其中, L 为图像的总灰度级; p_i 表示灰度值为 i 的像素数 D_i 与图像总像素数 D 之比, 即:

$$p_i = D_i / D$$

$P = \{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$ 反映了图像中具有不同灰度值像素的概率分布。 $i - D_i$ 间的关系图即为图像的灰度直方图。由于 $D = \sum_{i=0}^{L-1} D_i$, 所以 $i - p_i$ 间的关系图可以看作是图像的归一化灰度直方图。

2) 灰度标准差

图像的灰度标准差反映了图像相对灰度均值的离散状况, 标准差越大, 灰度分布越分散。

灰度标准差的定义为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (i - \bar{i})^2 \cdot p_i} \quad (8)$$

其中, $\bar{i}$ 为图像的灰度统计均值:

$$\bar{i} = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot p_i$$

上述指标都是针对特定融合目的和算法的。如灰度标准差是基于统计特性的, 因而比较适合提高分辨率的图像融合算法。而熵是基于信息量的, 比较适合评价提高信息量的图像融合算法, 如图像传输和图像特征提取等应用中。

5 图像的融合实验及性能评价

为了说明小波基对图像融合的影响, 我们选用了 haar、symN、coifN、biorN 和 rbioN 5 类共 39 个小波基参与实验。为了便于比较, 将这些小波基按表 1 中的形式进行编号。

为了使实验更具广泛性, 选用了图 3 ~ 图 6 共五组图像源。图 3 给出的是舰船的可见光和中红外图像, 图 4 给出了由飞机拍摄的地面的微光夜视图像和前视红外图像, 图 5 是医学诊疗中使用的无线电波的磁共振图像和 X 射线的 CT 图像, 图 6 是两幅多聚焦图像。

表1 小波基的编号

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
'haar'	'sym2'	'sym3'	'sym4'	'sym5'	'sym6'	'sym7'	'sym8'	'coif1'	'coif2'
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
'coif3'	'coif4'	'coif5'	'bior1.1'	'bior1.3'	'bior1.5'	'bior2.2'	'bior2.4'	'bior3.1'	'bior3.3'
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
'bior3.5'	'bior3.7'	'bior3.9'	'bior4.4'	'bior5.5'	'bior6.8'	'rbio1.1'	'rbio1.3'	'rbio1.5'	'rbio2.2'
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
'rbio2.4'	'rbio3.1'	'rbio3.3'	'rbio3.5'	'rbio3.7'	'rbio3.9'	'rbio4.4'	'rbio5.5'	'rbio6.8'	

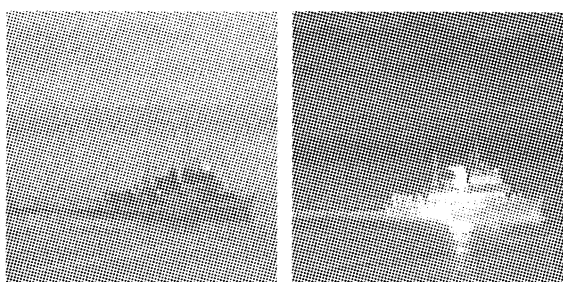


图3 舰船的可见光图像和中红外图像

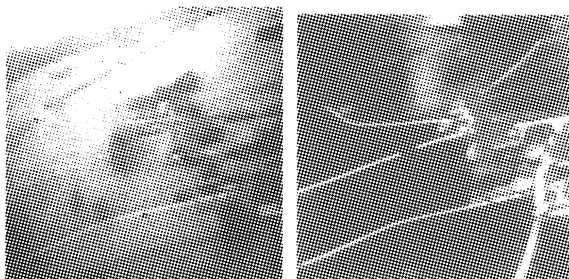


图4 地面的微光夜视图像和前视红外图像

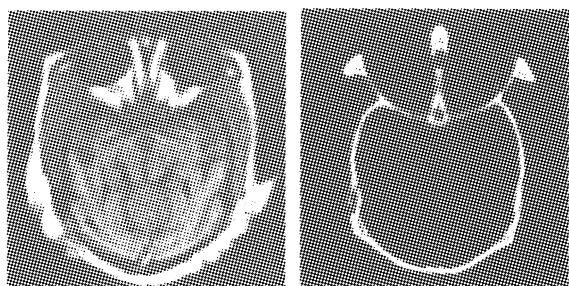


图5 磁共振图像和X射线CT图像

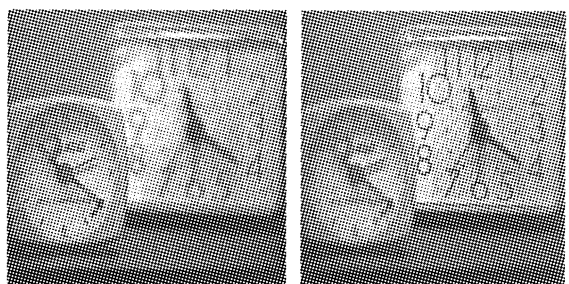


图6 近焦图像和远焦图像

实验时,首先使用熵最大的分解层数作为每一种小波基的最佳分解层数,然后在最佳分解层上,使用各种小波基进行图像融合的融合效果分析,分析的结果如图7和图8所示。

图7显示的是各种融合图像的熵,横坐标表示的是小波基的种类,纵坐标表示的是用最大值归一化后的熵值;图8所示为各融合图像的标准差,横坐标表示的是小波基的种类,纵坐标表示的是用最大值归一化后的标准差。

这几幅图中用圆圈标记的曲线分析的是图3中舰船的融合图像;用“×”标记的曲线分析的是图4中地面的融合图像;用菱形标记的曲线分析的是图5中的医学图像;用“*”标记的曲线分析的是图6中的多聚焦图像。

分别对图7和图8中的最大值进行分析,得到表2所示的结果。按照表2的参数进行数据融合的结果如图9~图14所示,从这些图中可以得出以下三点结论。

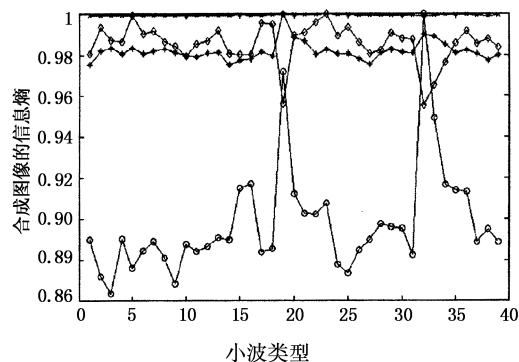


图7 融合图像的熵

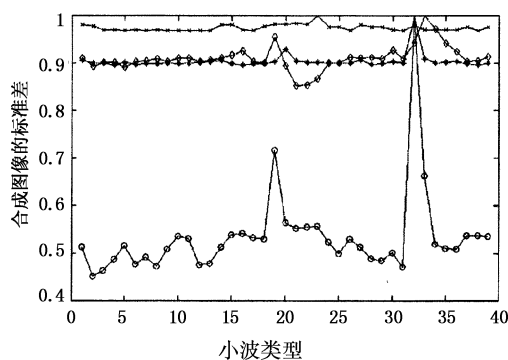


图8 融合图像的标准差

表2 对四类图像的最佳融合参数

评价指标	熵				标准差			
	舰船图像	地面图像	医学图像	多聚焦图像	舰船图像	地面图像	医学图像	多聚焦图像
图像类型	舰船图像	地面图像	医学图像	多聚焦图像	舰船图像	地面图像	医学图像	多聚焦图像
小波基的种类	32 'rbio3.1'	23 'bior3.9'	23 'bior3.9'	19 'bior3.1'	32 'rbio3.1'	23 'bior3.9'	33 'rbio3.3'	32 'rbio3.1'
分解层数	4	2	6	6	4	2	6	6

熵都可以对图像的融合效果进行评价,但使用标准差进行融合效果评价的应用范围不如熵指标的大,标准差无法正确地评价实验中的医学图像和多聚焦图像,如图13和图14

所示;

3)虽然对于某些领域的图像,使用rbioN系列小波进行图像融合时,取得了最大融合熵,但是其图像融合效果并不理想。进一步的实验表明,rbioN系列的小波不适合进行图像融合;

4)从图12可以看出,虽然使用bior3.1融合得到的这幅融合图像的信息熵最大,但是图像中的灰度分布不均匀,存在多处亮斑,进一步的实验表明bior3.9小波比bior3.1小波更适合进行图像融合,如图15所示;

5)从各幅融合图像的小波分解层数可以看出,分解的层数不是越多越好,对不同种类的图像存在不同的最佳分解层数,在基于小波变换进行图像融合处理时,要针对不同的图像实时地评价出其最佳分解层数。

6 结束语

图像的小波分解是一种多尺度、多分辨率的分解方法,这一特性使小波变换在图像融合中得到很好的应用。本文系统全面地分析了小波分解层数和小波基的种类对图像融合效果的影响,使用基于区域的融合规则,对四个领域的图像进行融合实验。实验表明在haar、symN、rbioN和biorN等小波系列中,bior3.9小波对各类图像的融合效果都最好,而融合处理时的小波分解层数则应根据不同图像做出恰当的选择。

参考文献:

- [1] Varshney P K. Multisensor Data Fusion[J]. Electron. & Commun. Engng. 1997,9(6):245-253.
- [2] 夏明革,何友,唐小明,等. 像素级图像融合方法分类与比较[J]. 火力与指挥控制,2002,27(3):1-4.
- [3] 刘贵喜,杨万海. 基于多尺度对比度图像融合方法及性能评价[J]. 光学学报,2001,21(11):1336-1342.
- [4] 陆宏波,施惠昌. 基于小波变换的图像融合方法[J]. 微电子与基础产品,2001,27(5):54-57.
- [5] 王蓉. 基于小波分解的图像融合算法研究[D]. 鞍山:鞍山科技大学,2003.
- [6] 王海晖,彭嘉雄,吴巍. 评价多传感器图像融合效果方法的比较[J]. 红外与激光工程,2004,33(2):189-193.

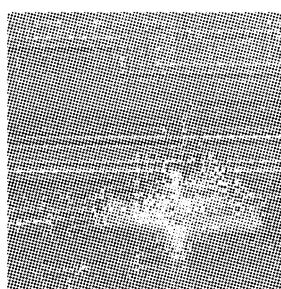


图9 'rbio3.1' + 4Level

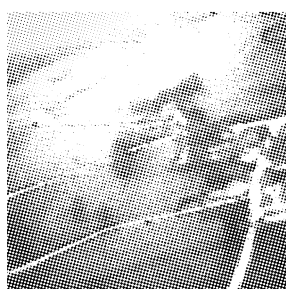


图10 'bior3.9' + 2Level

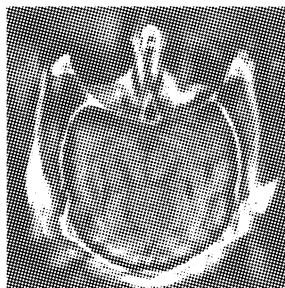


图11 'bior3.9' + 6Level

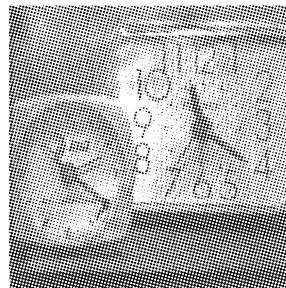


图12 'bior3.1' + 6Level

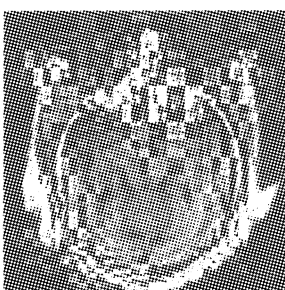


图13 'rbio3.3' + 6Level

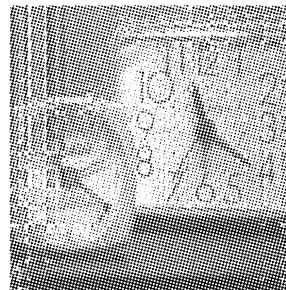


图14 'rbio3.1' + 6Level

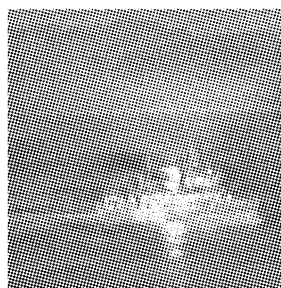


图15 'bior3.9' + 7Level

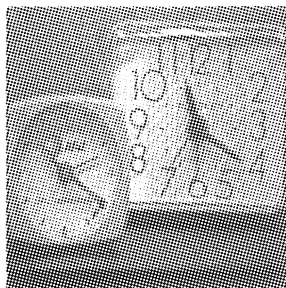


图16 'bior3.9' + 5Level

1)使用信息熵或灰度统计标准差等客观评价指标并不能完全正确地评价图像的融合效果,这也进一步说明了对图像融合效果的客观评价还无法取代人的主观评价,在评价过程中需结合主观评价进行;

2)从这些图中也可以看出,使用标准差和信息