

文章编号 1004-924X(2003)05-0516-07

基于小波系数邻域特征的图像融合

陈洪波, 王 强, 张孝飞, 韦春荣, 张超英
(广西师范大学 物理与信息工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:在利用小波变换进行图像融合的基础上,研究了融合因子的选取方法。由于小波变换在时域和频域中同时具有良好的局部特性,为了很好地利用小波变换的这种特征,提出了利用小波系数的邻域特征(邻域方差)来定义融合因子的思想。评价融合算法的性能应该从融合图像的信息增加量和融合图像的失真度两个方面来评价,融合图像的熵用来描述融合图像的信息含量,相对熵可以描述融合图像的失真度,评价结果显示出其方法的实用性。实验表明该算法用于医学图像的融合能得到很好的效果。

关键词:图像融合;小波系数;融合因子;方差;医学图像

中图分类号:TN911.74;TP391.7 **文献标识码:**A

Image fusion based on neighborhood features of wavelet coefficients

CHEN Hong-bo, WANG Qiang, ZHANG Xiao-fei, WEI Chun-rong, ZHANG Chao-ying

(College of Physics & Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Selection of fusion-factors is essential for an image fusion process, and it is therefore studied by using wavelet transformation to do image fusion. In order to make better use of the excellent spatial-frequency characteristics of wavelet transformation, it is suggested to use the neighboring region features of wavelet coefficients, such as variance, to define the fusion factors. The performance of fusion algorithm should be evaluated by both the increase in information and the distortion degree of fused images, the entropy of fused image is used to express the amount of information contained in the image, and the crossing-entropy of fused image is used to express the distortion degree of fused image. Experimental results indicate that the algorithm proposed is excellent, and can be used to obtain very good fused medical images.

Key words: image fusion; wavelet-coefficient; fusion-factor; variance; medical image

1 引 言

图像融合(Image Fusion)是把来自不同的成像设备或同一成像设备不同时间对同一目标检测

的多幅图像数据采用某种方法进行处理,生成一幅能够更有效地表示该目标的检测信息。在遥感技术中,把高分辨率图像和多光谱图像融合起来,可以把两种不同传感器的优点结合起来,以提高对图像的信息分析和提取能力^[1-2]。医学图像可

收稿日期:2003-03-16;修订日期:2003-08-17.

基金项目:广西科学基金项目(桂科基 0009004);广西自治区高校科研项目(桂科研 20007392)

以分为两大类^[3]:一类为以较高的空间分辨率提供脏器的解剖结构信息,如 CT(计算机 X 射线断层扫描)图像和 MRI(磁共振成像)图像;另一类可提供脏器的新陈代谢功能信息,但空间分辨率较差,如 PET(正电子发射计算机断层扫描)图像和 SPECT(单光子发射断层扫描)图像。如果能将表征解剖结构信息的图像和表征功能信息而空间分辨率差的图像进行融合,使得融合后的图像既包含结构信息,又包含功能信息,这对于病灶的定位和诊断的准确率有着很重要的意义。图像数据融合还可用于其他方面,如生物技术^[4]。

图像融合技术^[5]可以分为两大类:一类是以图像特征为基础的融合算法;另一类是以图像像素为基础的融合算法,该方法是通过求取两幅图像像素间的加权求而得到融合图像。其融合模型为:

$$F(x, y) = A(x, y) \times S_1(x, y) + B(x, y) \times S_2(x, y), \quad (1)$$

其中: $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 为融合因子,且 $A(x,$

$$\left\{ \begin{aligned} f_2^j(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{m, n} h(m - 2x) h(n - 2y) f_2^{j-1}(m, n) \\ f_2^{1j}(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{m, n} h(m - 2x) g(n - 2y) f_2^{j-1}(m, n) \\ f_2^{2j}(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{m, n} g(m - 2x) h(n - 2y) f_2^{j-1}(m, n) \\ f_2^{3j}(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{m, n} g(m - 2x) g(n - 2y) f_2^{j-1}(m, n) \end{aligned} \right. \quad j = 1, 2 \dots N; x, y \in Z, \quad (2)$$

其中 $f_2^j(x, y)$ 是尺度为 2^j 时小波变换的低频分量(即低频小波系数), $f_2^{1j}(x, y)$ 、 $f_2^{2j}(x, y)$ 和 $f_2^{3j}(x, y)$ 分别表示图像在尺度为 2^j 时的水平、垂直和对角分量(即高频小波系数)。相应的重构算法可表示为:

$$\begin{aligned} & f_2^{j-1}(x, y) \\ &= 2\{ f_2^j(m, n) \bar{h}(x - 2m) \bar{h}(y - 2n) + \\ & f_2^{1j}(m, n) \bar{h}(x - 2m) \bar{g}(y - 2n) + \\ & f_2^{2j}(m, n) \bar{g}(x - 2m) \bar{h}(y - 2n) + \\ & f_2^{3j}(m, n) \bar{g}(x - 2m) \bar{g}(y - 2n) \}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $j = 1, 2, \dots, N; x, y \in Z$ 。 $\bar{h}(k)$ 和 $\bar{g}(k)$ 为重构滤波器系数。

小波变换最大的优点是在空域和频域中同时

$y) + B(x, y) = 1, S_1(x, y)$ 和 $S_2(x, y)$ 为融合源图像或经过某种变换得到的数据(如小波系数), $F(x, y)$ 为融合后的图像或经过某种变换得到的数据(如小波系数)。

为此提出一种基于小波系数的邻域特征来进行图像融合。先对图像进行小波变换,得到小波系数,利用小波系数的邻域特征(方差)来选取融合因子。该算法属于基于像素的图像融合算法。

2 二维离散小波变换^[6-8]及其特性分析

数字图像在计算机中一般都是以二维数组来表示,对应数字图像的小波变换也是二维离散小波变换。二维离散小波变换可以简述如下:

设尺度函数 $\phi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$ 对应的滤波器系数分别为 $h(k)$ 和 $g(k)$, $f_2^0(x, y)$ 表示原图像。则二维小波变换的算法可描述为:

具有良好的局部特性。式(2)定义的小波变换对同一目标两个信源图像(聚焦不同)进行一层小波变换(图像的大小为 $128 \times 128 \times 8$,采用双正交小波 bior6.8 滤波器)得到如图 1 所示的结果。通过数值分布统计,信源图像 A 和 B 经过小波分解后的子图像具有如下特性:

(1)在源图像中数据有较大变化幅度的区域,在各分量(即小波系数)中相应区域的数值也有较大变化;反之,在源图像中数据有较小变化幅度的区域,在各分量(即小波系数)中相应区域的数值变化也较小。

(2)对同一目标或物体的两个信源图像来说,其低频图像相应区域的数据值相同或相近;而高频子图像却有显著差别。

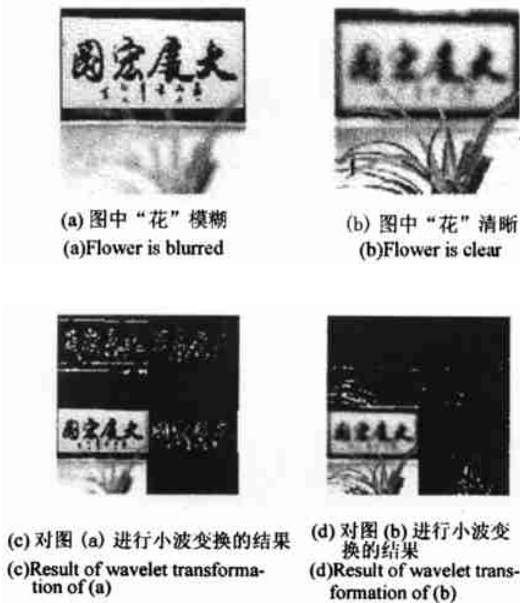


图 1 融合源图像以及小波变换结果

Fig. 1 Source images and the results of the WT

同时,由式(2)定义的小波变换可以看出,源图像和变换得到的小波系数之间不是一一对应的关系,源图像中的一个像素可以分解成多个小波系数(通常是以某个小波系数为中心的邻域区域),一个小波系数与多个像素有关(通常是以某像素为中心的邻域区域)。所以利用小波变换进行图像融合时,融合因子的确定需要考虑它的邻域的某些特征。

3 基于小波系数邻域特征的融合因子的确定

图像融合就是要在融合图像中包含所有参与融合图像的变化幅度较大的区域。

数学期望和方差是统计量的两个最重要的特征量,某邻域的数学期望是描述小波系数邻域值的平均水平,不能描述该邻域的变化程度;而某邻域的方差是用于描述该邻域内的小波系数的变化程度和分散程度,在该邻域的方差越大,其小波系数的变化越大,越分散。

融合因子的确定有很多种方法,基于各个分量的统计特征^[9]如方差来确定融合因子,采用小波系数的最大值^[10]来作为融合图像的小波系数。本文采用小波系数的邻域的方差来确定融合因子。

根据第 2 节分析的小波变换的特征、融合的要求和方差的特点以及式(1)中的要求: $A(x, y) + B(x, y) = 1$, 可以采用邻域中的方差来确定融合因子。

由小波系数邻域的方差来确定融合因子,首先要确定邻域的大小 K , 如何选择邻域的大小是这种融合方法的难点。邻域大小的选择与参与融合的图像特点有关,一般通过实验来确定。实验证明选取 $K = 5$ 时的效果是比较好的。

设 $w_n(x, y)$ 表示第 n 幅图像的某个小波系数的 K 邻域的方差:

$$w_n(x, y) = \frac{\sum_{i=-K/2}^{K/2} \sum_{j=-K/2}^{K/2} (w_n(x+i, y+j) - \overline{w_n}(x, y))^2}{K \times K} \quad (4)$$

其中: $w_n(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 的灰度值,

$$\overline{w_n}(x, y) = \frac{\sum_{p=-K/2}^{K/2} \sum_{q=-K/2}^{K/2} w_n(x+p, y+q)}{K \times K}$$

以一层小波变换之后的低频分量为例。设 $w_n^0(x, y)$, $w_n^1(x, y)$, $w_n^2(x, y)$, $w_n^3(x, y)$ 分别表示第 n 幅图像在低频、水平、垂直和对角分量中某点的 K 邻域方差,则第 n 幅源图的低频分量的小波系数按式(4)计算得到各点的 $w_n^0(x, y)$, 其中 $x, y \in [0, N/2]$, N 为图像宽和高(设图像的宽和高相等)的大小。在低频分量中由式(5)确定融合因子。

$$\begin{cases} A(x, y) = w_n^0(x, y) / (w_n^0(x, y) + w_n^1(x, y)) \\ B(x, y) = w_n^1(x, y) / (w_n^0(x, y) + w_n^1(x, y)) \end{cases} \quad x, y \in [0, N/2], \quad (5)$$

在水平、垂直和对角分量中由式(7)计算融合因子。

$$\begin{cases} A(x, y) = w_n^{\tilde{1}}(x, y) / (w_n^{\tilde{1}}(x, y) + w_n^{\tilde{2}}(x, y)) \\ B(x, y) = w_n^{\tilde{2}}(x, y) / (w_n^{\tilde{1}}(x, y) + w_n^{\tilde{2}}(x, y)) \end{cases}, \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} \tilde{z}_1(x, y) = \frac{1}{3}(x + N/2, y) + \frac{2}{3}(x, y + N/2) + \frac{3}{3}(x + N/2, y + N/2) \\ \tilde{z}_2(x, y) = \frac{1}{2}(x + N/2, y) + \frac{2}{2}(x, y + N/2) + \frac{3}{2}(x + N/2, y + N/2) \end{cases}$$

则:

$$\begin{cases} A(x + N/2, y) = A(x, y + N/2) = A(x + N/2, y + N/2) = A(x, y) \\ B(x + N/2, y) = B(x, y + N/2) = B(x + N/2, y + N/2) = B(x, y) \end{cases}, \quad (7)$$

其中 $x, y \in [0, N/2]$, $\frac{1}{n}(x, y)$ 、 $\frac{2}{n}(x, y)$ 、 $\frac{3}{n}(x, y)$ 由式(4)计算得到。

4 图像的融合算法描述

图像经过公式(2)小波分解后,得到水平、垂直和对角分量以及低频分量,其中水平、垂直、对角三个分量都是图像的细节部分,低频分量集中了图像的主要能量,这就使得图像在频率上得到分离。图像数据融合的基本思想是先对源图像进行二维小波分解;然后在小波变换域内(即小波系数)通过比较各图像的细节信息,在不同尺度上实现图像融合,提取出重要的小波系数;最后进行小波反变换,便可得到数据融合之后的图像。

图像融合的算法描述如下:

Step 1:根据式(2)对参与融合的源图像分别进行小波变换,得到各个不同频率分量的小波系数。设分解层数为 j 。

Step 2:在不同的分量中,对分解得到的小波系数,根据本文第 3 节的方法来确定融合因子 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$,之后由式(1)求得融合图像的小波系数。

Step 3:对融合图像的小波系数由式(3)进行小波逆变换,得到融合图像。

本文主要讨论采用不同的方法来确定融合因子 A 和 B ,并采用融合图像的熵、相对熵以及结合目视的标准来对它们进行评价。

5 融合实验结果及评价

参加图像融合的图像必须经过对准,两幅图像是否对准,直接影响融合的效果。参加实验的图像已经对准,图像大小为 $128 \times 128 \times 8$ 。小波变换所采用的是双正交小波(bior6.8)的滤波器,所有结果都是经过一层小波变换得到的。实验结果在 Visual c++ 6.0 环境下运行得到。



(a) 由融合算法 1 得到的结果
(a) Result of the scheme 1



(b) 由融合算法 2 得到的结果
(b) Result of the scheme 2



(c) 由融合算法 3 得到的结果
(c) Result of the scheme 3

图 2 融合图像

Fig. 2 Fusion images

采用不同的融合因子对图(1)中(a)和(b)两幅图像融合后的图像如图(2)所示。(a)是由小波变换后各分量的方差来定义的融合因子融合得到的结果,由图可以看到融合的图像比较模糊,融合效果不是很好;(b)是采用两个源图像的小波系数

最大值作为融合图像的小波系数,由图可以看到“字”和“花”都显得很清晰,但融合后也产生了一些多余的信息,如一些黑点,在这里的融合效果还能够接受,如果对于图像的噪声比较大时,融合效果就要大打折扣;(c)是由邻域大小的邻域方差定

义的融合因子得到的图像。可以看到融合后,“字”和“花”都显得清晰,又没有多余的生成信息,从目视的标准看比前两种效果要好一些。图像融合要求融合后的图像所含信息量的增加,同时又无大的失真,所以采用融合图像的熵及融合图像和标准参考图像的相对熵来评价融合算法的效果。熵^[11,12]是衡量该图像信息丰富程度的一个重要指标。图像的熵定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log(p_i), \quad (8)$$

其中 L 为图像总的灰度级数,在实验的图像中 $L = 256$, p_i 表示灰度值为 i 的概率密度, $i - p_i$ 之间的关系图可以看作是图像的归一化灰度直方图。

相对熵^[11,12]又称为交叉熵,用来衡量两幅图

像之间的差异,相对熵越小,则它们之间的差异越小。若标准参考图像为 R , 融合图像为 F , 则它们的相对熵为:

$$H_{ce} = \sum_{i=0}^{L-1} P_{Ri} \log \frac{P_{Ri}}{P_{Fi}}, \quad (9)$$

其中 L 为图像的总灰度级, $i - P_{Ri}$ 是标准参考图像的归一化灰度直方图, $i - P_{Fi}$ 是融合图像的归一化灰度直方图。

对于同一组融合实验,若某种融合方法获得的融合图像的熵相对较大,相对熵相对较小,则说明该融合方法所得到的结果图像包含的信息越多,而且失真越小,则融合算法的性能相对较好。采用三种融合因子所得到的结果图像的熵和相对熵见表 1。

表 1 融合算法的性能指标

Tab. 1 Performance of different fusion schemes for Fig. 1 (a) & (b)

	算法一 ^[9]	算法二 ^[10]	算法三(本文算法)
H	4.972 937	5.078 269	5.144 963
H_{ce}	0.061 887	0.093 446	0.010 875
说明	采用小波分解后的各分量中的方差定义的融合因子融合得到的图像	将小波系数的最大值作为融合图像的小波系数融合得到的图像	采用邻域方差定义的融合因子融合得到的图像

从表 1 可以看出,采用算法三融合得到的图像熵最大,而且相对熵最小,说明融合算法的性能最好。算法二所得到的融合图像的熵比算法一要大,说明算法二所得到的图像信息增加得多,但它的相对熵最大,说明在信息增加的同时,图像发生的失真最大。可以看到算法二的融合图像中产生了一些多余的信息。有时,特别是当图像含有噪声时,如下一节的医学图像的融合中,采用算法二得到的融合图像的熵可能比算法三得到的融合图

像的熵还要大,同时图像的相对熵也会随着增大,即在信息增加的同时,图像失真也就越大。

6 医学图像融合

将本文算法用于医学图像的融合,得到了同样的结果。结果图像如图 3 所示,熵和相对熵如表 2 所示。

表 2 医学图像融合算法的性能指标

Tab. 2 Performance of different fusion schemes of medical images

	算法一 ^[9]	算法二 ^[10]	算法三(本文算法)
H	4.782 873	5.044 939	4.975 125
H_{ce}	0.054 012	0.080 283	0.012 875
说明	采用小波分解后的各分量中的方差定义的融合因子融合得到的图像	将小波系数的最大值作为融合图像的小波系数融合得到的图像	采用邻域方差定义的融合因子融合得到的图像

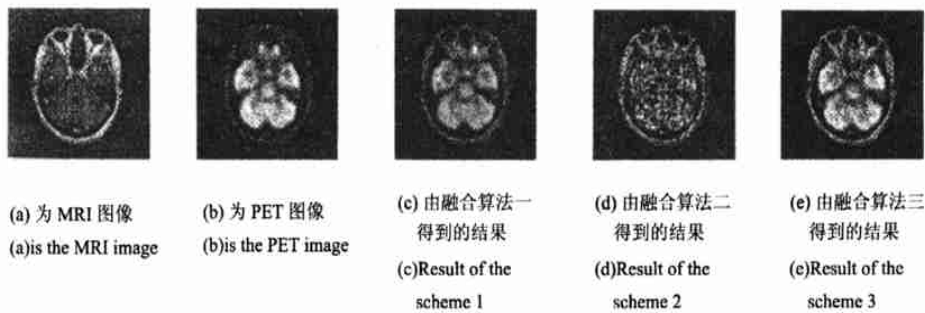


图 3 医学图像融合(a)和(b)为融合源图像

Fig. 3 The fusion of medical images (a) and (b) are the source images

图 3 中(a)和(b)是融合源图像(由文献[6]提供)。由图 3 和表 2 可以看出,利用小波系数的分量中的方差来定义融合因子得到的融合图像(c)比较模糊,即信息增加量比较小,而且图像的失真度也比较大。由小波系数的最大值作为融合图像的最大值时得到的融合图像(d)的熵最大,也就是信息的增加量最大,但它相对于标准图像的失真度也是相当大的,这种现象是由于一些多余的生成物引起的。利用邻域方差定义的融合因子融合得到的图像(e)很清晰,而又没有多余的生成物。

故定义的融合因子对于医学图像的融合是相当有效的。

7 小结

采用小波系数的邻域方差来定义融合因子能很好地利用小波变换的时-频局部特性。采用融合图像的熵和交叉熵来对融合的效果进行评价,与多种融合因子定义方法进行比较,说明由邻域方差定义的融合因子融合得到的图像效果最好。

参考文献:

- [1] 钟志勇,陈鹰.多源信息融合中小波变换的应用研究[J].测绘学报,2002,31(5):56-60.
ZHONG ZH Y, CHEN Y. On application of wavelet transformation to multi-source information fusion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(5):56-60. (in Chinese)
- [2] 王智均,李德仁,李清泉.利用小波变换对影像进行融合的研究[J].武汉测绘科技大学学报,2000,25(2):137-142.
WANG ZH J, LI D R, LI Q Q. Image fusion with wavelets analysis[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(2):137-142. (in Chinese)
- [3] 张孝飞,王强,韦春荣,等.医学图像融合技术研究综述[J].广西科学,2002,9(1):64-68.
ZHANG X F, WANG Q, WEI CH R. A summary of the research of medical image fusion[J]. *Guangxi Science*, 2002, 9(1):64-68. (in Chinese)
- [4] 李勤,代彩虹,俞信,等.图像融合方法在细胞图像处理中的应用[J].光学学报,1998,18(12):1658-1662
LI Q, DAI C H, YU X. *et al.* Application of image fusion methods to cell imaging processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12):1658-1662. (in Chinese)
- [5] 张煜,刘哲星,李树祥,等.医学图像信息融合技术的发展[J].国外医学生物医学工程分册,2000,23(4):202-205
ZHANG Y, LIU Z X, LI SH X, *et al.* The development of medical image fusion technologies[J]. *Foreign Medical Sciences (Biomedical Engineering Fascicle)*, 2000, 23(4):202-205. (in Chinese)
- [6] 朱志刚.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,1999.
KENNETH ZH G. *Digital image processing* [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 1999. (in Chinese)
- [7] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
CHENG ZH X. *Algorithm and application of wavelet analysis* [M]. Xi'an:Publishing House of Xi'an Highway University, 1999. (in Chinese)

- [8] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1998.
QIN Q Q, YANG Z K. Analysis of practical wavelet[M]. Xi'an:Publishing House of Xidian University, 1998. (in Chinese)
- [9] 孙辉.基于小波变换的图像数据融合方法[J].光学精密工程,2000,8(6):551-553.
SUN H. Data fusion for image based on wavelet transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6):551-553. (in Chinese)
- [10] 陆宏波,施惠昌.基于小波变换的图像融合方法[J].电子工程师,2001,27(5):54-57.
LU H B, SHI H CH. Digital image fusion based on wavelet transform[J]. *Electronic Engineer*, 2001, 27(5):54-57.
- [11] 李克鲁,王霞,郭敏茹.小波变换的信息融合方法及结果评价[J].国土资源遥感,1999,42(4):46-52.
LI K L, WANG X, GUO M R. Information fusion method of wavelet transformation and evaluation[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, 42(4):46-52. (in Chinese)
- [12] 刘贵喜,杨万海.基于多尺度对比塔的图像融合方法及性能评价[J].光学学报,2001,21(11):1336-1342.
LIU G X, YANG W H. A mutliscale contrast-pyramid based image fusion scheme and its performance evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(11):1336-1342. (in Chinese)

作者简介:陈洪波(1972-),男,湖南茶陵人,广西师大物电系计算机软件与理论专业硕士研究生,主要研究内容为数据融合、模式识别、神经网络等,发表论文 5 篇;

王 强(1952-),男,博士,广西师大物电系教授,硕士生导师,主要从事图像处理、模式识别、神经网络、计算机视觉等方面的研究,在国内外学术刊物上公开发表论文 30 余篇,并获专利 3 项。