文章编号: 1001-5078(2006)03-0227-04

基于小波系数相关性的图像融合新方法

陶冰洁[1,2],王敬儒[1],张启衡[1]
(1. 中国科学院光电技术研究所,四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要:文中在阐述小波变换原理的基础上,针对融合算子的构造,给出了一种新的基于小波系数相关性的融合方法。以分解后的高频子图像的区域均值、方差、协方差统计参量构造匹配度和加权因子,以此对高频子图像的对应区域进行融合计算;低频部分采取加权平均融合规则;最后,通过小波逆变换得到融合图像。用熵、交叉熵和交互信息量对融合结果进行了客观评价,并与其它几种算法进行了比较。实验结果表明,此方法融合效果要优于一般融合方法,计算也比较简单,有一定的工程实用价值。

关键词:图像融合;小波变换;分解系数;相关;融合性能
中图分类号: TP391 **文献标识码**: A

Image Fusion Based on Relativity of Wavelet Coefficients

TAO Bing-jie[1,2], WANG Jing-ru[1], ZHANG Qi-heng[1]
(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on expatiate wavelet transform principle, aimed at the construction of fusion operator, a new scheme using the correlation of decomposition coefficients is presented. With mean, variance and covariance of decomposed high frequency sub-image, the matching degree and adding coefficient can be gained, and then the fusion calculation of high frequency sub-image can be completed. For low frequency sub-image, average coefficient is adopted. Finally the fusion image is obtained by taking inverse wavelet transform. In addition, with entropy, cross entropy and mutual information, the performance of fusion scheme is evaluated and compared with other schemes. The experimental results show this fusion scheme is effective than other fusion schemes, the calculation course is simple, and has application value to engineering.

Key words: image fusion; wavelet transform; decomposition coefficients; correlation; fusion performance

1 引 言

图像融合是二十世纪七十年代后期提出的新概念,是多传感器信息融合中可视信息部分的融合,是将多元信道所采集的关于同一目标的图像经过一定的图像处理,提取各自信道的信息,最后综合成统一图像或综合图像特征以供观察或进一步处理。图像融合一般分为三类:像素级、特征级和决策级融合。这种分类方法是基于图像的表征层来划分的[1]。像素级图像融合是把来自多传感器的信息互补合成一幅新的图像,提供比原图像更丰富的视觉信息。

目前,在像素级图像融合方法中,基于小波变换的融合方法具有良好的效果[2-7]。

多分辨率小波融合方法用于图像融合的可行性已得到了广泛的认同,当前研究的热点是融合过程中融合规则和融合算子的选择。先后有基于局部方

基金项目:国家 863高技术项目(2003AA823050)。
作者简介:陶冰洁(1977 -),女,博士生,主要研究方向为图像处理,数据融合等。E-mail: taobingjie11@163.com
收稿日期: 2005-07-29

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

差的融合算法[3],基于局部梯度的融合算法[5],对于 TM和 SPOT图像,提出用未分解的 TM放大图像与小波分解后的 SPOT图像的高频部分重构得到的图像进行直接相加来得到融合图像[6],比较成熟有效的方法还有文献[7]提出利用不同的特征选择算子等,上述这些方法都没有考虑到原始图像之间的相关性。这里通过计算分解后的小波系数的相关系数来构造一种新的区域融合算法。

2 图像的小波分解

2.1 图像的小波分解原理

图像为二维信号,空间 $L^2(R)$变为二维空间 $L^2(R\times R)$,则二维尺度函数变为 $\phi(x,y)$。考虑二维尺度函数是可分离的情况,也就是[8]:

$$\phi(x,y)=\phi(x)\phi(y) \tag{1}$$

其中,$\phi(x)$是一个一维尺度函数。若 $\Psi(x)$是相应的小波($\Psi(x)=\sum_k h_1(k)\phi(2x-k)$),那么下列三个二维基本小波:

$$\Psi^1(x,y)=\phi(x)\Psi(y),$$
$$\Psi^2(x,y)=\Psi(x)\phi(y),$$
$$\Psi^3(x,Y)=\Psi(x)\Psi(y)$$

就建立了二维小波变换的基础。

这三个小波在不同的尺度和方向上提取图像细节。在低的水平频率和高的垂直频率处 $|\hat{\Psi}^1|$大,在高的水平、低的垂直频率处 $|\hat{\Psi}^2|$大,高的水平和垂直频率处 $|\hat{\Psi}^3|$大。

图像可以依据二维小波按如下方式扩展。在变换的每一层次,图像都被分解为四个四分之一大小的图像,如图 1所示。

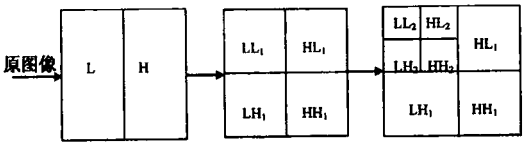


图 1 图像的小波分解示意图

Fig 1 image wavelet transform sketch map

其中,L表示低频;H表示高频;下标 1、2表示一级或二级分解。在每一分解层上,图像均被分解为 LL、LH、HL和 HH四个频带,下一层的分解仅对低频分量 LL进行分解。这四个子图像中的每一个都是由原图与一个小波基函数的内积后,再经过在 x和 y方向都进行 2倍的间隔采样而生成的。这是正变换,也就是图像的分解。逆变换,也就是图像的重建,是通过图像的增频采样和卷积来实现的。

2.2 图像的快速小波分解

Mallat在 Burt和 Adelson的塔形图像分解和重构算法的启发下,提出了小波变换的 Mallat快速算法[9]。若设 H(低通)和 G(高通)为两个一维镜像滤波算子,其下标 r和 c分别对应于图像的行和列,则按照二维 Mallat算法,在尺度 $j-1$上有如下的 Mallat分解公式:

$$\begin{cases} C_j=H_cH_rC_{j-1} \\ D_j^1=G_cH_rC_{j-1} \\ D_j^2=H_cG_rC_{j-1} \\ D_j^3=G_cG_rC_{j-1} \end{cases} \tag{2}$$

这里,C_j、D_j^1、D_j^2、D_j^3分别对应于图像 C_{j-1}的低频成分、垂直方向上的高频成分、水平方向上的高频成分、对角方向上的高频成分。与之对应的二维图像的 Mallat重构算法为:

$$C_{j-1}=H_r^*H_c^*C_j+H_r^*G_c^*D_j^1+G_r^*H_c^*D_j^2+G_r^*G_c^*D_j^3 \tag{3}$$

其中,H^*和 G^*分别为 H、G的共扼转置矩阵。

3 基于小波系数互相关性的融合方法

3.1 图像的融合方案

若对二维图像进行 N层的小波分解,最终将有(3N+1)个不同频带,其中包含 3N个高频带和一个低频带。

融合基本步骤如下:

(1)对每一源图像分别进行小波分解,建立图像的小波金字塔分解;

(2)对各分解层分别进行融合处理,采用不同的融合算子对各分解层的不同频率分量进行融合处理,最终得到融合后的小波金字塔;

(3)对融合后所得的小波金字塔进行小波逆变换,所得到的重构图像即为融合后的图像。

这里我们将两幅原始图像分别作二维小波分解,通过调节子图像的系数,也就是分解系数,来得到重构系数。

3.2 小波滤波器组的选择

正交小波滤波器组有许多优点,例如两路输出互相正交,实现简单,分解和重建滤波器组相同等;但也有不足,如:不能实现性能较为完善的线性相位滤波器,4个滤波器的长度都相等。对于数字信号处理、图像处理,滤波器的相位至关重要,尤其是人类视觉对图像相位失真比较敏感,如果不考虑小波滤波器的相位问题,将会产生较大影响,因此在图像

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

处理中更多地采用具有线性相位的双正交滤波器组[10]。通过实验比较,我们选取了具有线性相位的Biorthogonal小波系。

3.2 匹配度及加权因子的构造

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。图像的统计特征常常被用来描述图像的灰度值分布情况。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,在该邻域内的方差越大,其小波系数的变化越大,越分散。两幅图像对应区域的协方差描述了两者间的差异,而由均值、方差、协方差构造的相关系数则表征了两幅图像间的相关性。这里用均值、方差、相关等统计参量构造一种新的融合算法。以下计算以两幅图像为例,对3幅以上的图像融合算法与此类似。

对分解后图像的低频部分,采取加权平均融合规则。对于高频分量,采用基于区域特性量测的选择和加权算子,确定方法如下:

a)把分解后的高频子图像分成 $M\times N$ (一般 M, N 取奇数)的小块;

b)构造匹配度及加权系数。首先计算各子带系数对应窗口内的均值和方差,窗口中以 (x, y) 为中心的区域均值和方差分别为:

$$m_i(x, y) = \frac{1}{M\times N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} f_i\left(x+m-\frac{M+1}{2}, y+n-\frac{N+1}{2}\right) \tag{4}$$

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{M\times N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left(f_i\left(x+m-\frac{M+1}{2}, y+n-\frac{N+1}{2}\right)-m_i(x, y)\right)^2 \tag{5}$$

图像1以 (x, y) 为中心的区域与图像2对应区域的协方差为:

$$\beta^2(x, y) = \frac{1}{M\times N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left(f_1\left(x+m-\frac{M+1}{2}, y+n-\frac{N+1}{2}\right)-m_1(x, y)\right)\times\left(f_2\left(x+m-\frac{M+1}{2}, y+n-\frac{N+1}{2}\right)-m_2(x, y)\right) \tag{6}$$

则两者相关系数为: $\gamma = \dfrac{\beta^2}{\sigma_1\sigma_2}$ (7)

由相关系数的性质可知, $|\gamma|\le 1$,因此可以构造加权系数 k $k_{max} = 1-\frac{1}{2}\gamma$, $k_{min} = 1-k_{max}$;

c)利用加权系数对高频子图像的对应区域进行融合计算:

$$f(x, y) = k_{max}MAX(f_1(x, y), f_2(x, y)) + k_{min}MIN(f_1(x, y), f_2(x, y)) \tag{8}$$

其中, $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ 为子带图像窗口中心位置像素灰度值;

d)重复以上过程,遍历整幅子带图像,直到各分解层三个方向的高频子图像全部融合完毕;

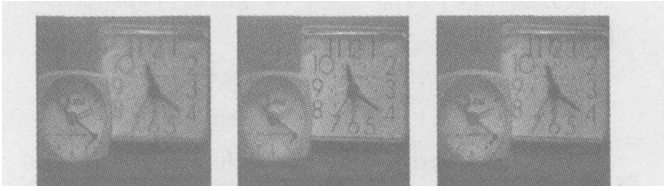
e)将融合后的高频子图像与低分辨率低频图像重构得到融合图像。

4 实验结果及评价

4.1 实验结果

图2为不同聚焦图像的融合实验,其目的是解决因不同聚焦而引起图像局部模糊的问题。因图中大小闹钟与镜头距离不一样,两者不能同时被聚焦。其中,(a)聚焦点在左边,左边的闹钟清晰而右边的闹钟模糊,(b)聚焦点在右边,左边的闹钟模糊而右边的闹钟清晰。

(c)为将(a)、(b)融合后得到的图像,图中两个闹钟均清晰可见。由实验结果可见,经过融合后,得到了两边都聚焦清晰的图像。



(a) 聚焦在左边的图像 (a) focus on the left

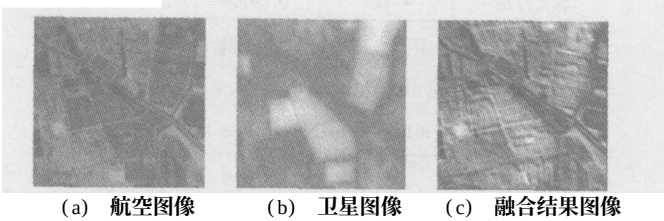
(b) 聚焦在右边的图像 (b) focus on the right

(c) 融合结果图像 (c) fused image (all focus)

图2 不同聚焦图像的融合

Fig 2 the fusion of different focus images

图3(a)和(b)分别为高空间分辨率的航空图像和低空间分辨率的卫星图像,航空图像中的河流、山脉和房屋的轮廓比较清晰,而卫星图像有较高的亮度。图3(c)为本文提出的基于小波系数相关性的融合算法得到的融合图像。从融合结果可以看出,河流、山脉和房屋的轮廓清晰有立体感,亮度也提高了。



(a) 航空图像 (a) aviation image

(b) 卫星图像 (b) secondary planet image

(c) 融合结果图像 (c) fused image

图3 航空图像和卫星图像的融合

Fig 3 the fusion of aviation and secondary planet images

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图4所选用的是两幅拍摄海面上井架的可见光图像和红外图像。可见光图像中落日非常明显,而红外图像中天空云层背景和井架上半部分很清晰。(c)为融合后的图像。可见,融合后的图像保留了各原始图像的特征和细节信息。

(a) 可见光图像 (b) 红外图像 (c) 融合结果图像
(a) visible light image (b) infrared image (c) fused image

图4 可见光图像和红外图像的融合
Fig 4 the fusion of visible light and infrared images

以上实验均采用MATLAB7.0编程实现,用Bior3.7小波基对参加融合的图像作二层小波分解。

4.2 客观性能评价

我们采用熵、交叉熵和交互信息量多种统计参量,对本文介绍的融合方法进行定量的分析和评价。其中,交叉熵取融合结果图像分别与两原始图像的交叉熵的平均值,交互信息量根据BUTTE. A. J等人提出的方法进行计算。我们将本文方法与简单系数加权方法和基于局部方差[3]的方法进行对比,结果如表1～3所示。

表1 不同聚焦图像融合的性能指标
Table1 valuation parameters of different focus images fusion

融合方法	熵	交叉熵	交互信息量
简单系数加权	5.0702	0.33087	9.7026
局部方差	5.0981	0.33189	9.7271
本文方法	5.1123	0.30162	9.8220

表2 航空图像和卫星图像融合的性能指标
Table2 evaluation parameters of aviation and secondary planet images fusion

融合方法	熵	交叉熵	交互信息量
简单系数加权	4.7225	0.87431	8.8174
局部方差	4.7858	0.83393	8.8872
本文方法	4.786	0.64954	8.8946

表3 可见光图像与红外图像融合的性能指标
Table3 evaluation parameters of visible light and infrared images fusion

融合方法	熵	交叉熵	交互信息量
简单系数加权	5.0171	1.4328	8.3324
局部方差	5.0203	1.5218	8.3306
本文方法	5.0208	1.4072	8.4096

从表1～3可以看出,本文所提出的方法在各项性能指标上都要优于简单系数加权方法和局部方差融合算法,其熵、交互信息量的值比后两者大,而交叉熵小于后两者。另外,我们用此方法对医学图像、运动模糊图像和SPOT图像等的融合也做过实验,得到了相同的结论。

5 结 论

本文在小波变换的基础上提出了一种基于小波系数相关性的图像融合算法。从视觉效果看,有较好的融合效果;从客观评价指标看,其融合性能要优于现有的方法。实验结果表明,该方法是有效可行的,可用于图像融合的诸多领域。下一步工作是如何开发兼有稳健性和准确性的融合算法,并同时简化算法,满足融合系统的实时性要求,这仍是图像融合研究的难点和热点问题。

参考文献:

[1] 倪国强.多波段图像融合算法研究及其新发展[J].光电子技术与信息,2001,14(5):11-12.

[2] 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].红外与毫米波学报,2001,20(3):207-210.

[3] 强赞霞,彭嘉雄,王洪群.基于小波变换局部方差的遥感图像融合[J].华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(6):89-91.

[4] Nunez J, Otazu X, Fors O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1999, 37(3):1204-1211.

[5] 陶观群,李大鹏,陆光华.基于小波变换的不同融合规则的图像融合研究[J].红外与激光工程,2003,32(2):175.

[6] 霍宏涛,游先祥.小波变换在遥感图像融合中的应用研究[J].中国图像图形学报,2003,8(A)(5):551-556.

[7] 蒋小瑜,高稚允.小波变换在多光谱图像融合中的应用[J].电子学报,1997,(8):105-109.

[8] Kenneth R C,朱志刚,等译.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,1998.

[9] Mallat S G. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans, on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7):674-693.

[10] Butte A J, Kohane I S. Mutual information relevance networks: functional genomic clustering using pairwise entropy measurements[J]. Children's hospital informatics program and division of endocrinology, USA.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net