基于区域小波变换的序列显微图像融合

姜志国 韩冬兵 薛斌党 周孝宽

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 利用图像处理技术实现序列显微图像的融合显示是解决显微成像焦深有限的有效方法. 针对空域融合算法在处理离焦步长较大和透明显微图像时存在的块效应和重影现象,基于图像像素间高度的相关性和小波变换多分辨率分析的特点,提出了一种基于区域小波变换的序列显微图像融合算法:在小波变换域内进行序列显微图像融合时,不同频段选择不同的融合算子;在确定融合的小波系数时,不仅考虑到相应位置的小波系数,还考虑了与它相邻的小波系数,使得融合后图像克服了空域算法存在的块效应和重影现象. 同时,研究了不同的小波滤波器对图像融合质量的影响. 实验证明,该方法具有很好的融合效果.

关 键 词: 图像融合; 小波变换; 显微图像; 多层聚焦

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0399-05

Series microscopy images fusion based on area wavelet transform

Jiang Zhiguo Han Dongbing Xue Bindang Zhou Xiaokuan

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Digital image fusion technique based on multi-focus series microscopy images is an effective method to extend the depth of focus. In order to avoid the blocking effect of fused image by spatial domain fusion algorithm when large focusing step is chosen or the image samples are transparent, a series microscopy images fusion algorithm based on area wavelet transform is proposed. Considering the fact that neighboring pixels are related and wavelet transform has the multi-resolution merit, fusion strategies are as follow: fusion operators are different corresponding to different frequency region, and fusion process is based on region coefficients of wavelet transform. Meanwhile, the influences of different wavelet bases on performance of fusion are investigated. Experimental results show that the blur is improved in obtained fused image and the blocking effect is eliminated. The fusion performance of this method is satisfactory.

Key words: image fusion; wavelet transform; microscopy image; multi-focus

在显微光学成像中,低倍显微镜工作距离长,景深比较大,由于显微镜物镜焦深范围小,随着放大倍数的增大,景深会相应减小. 只有那些在聚焦平面或其附近的结构才是可见的,这使得即便是结构最简单的、三维深度相对平坦的物体也不可能在一幅图像中完全聚焦清晰[1]. 而生物医学及材料科学的发展要求显微镜成像既要有更高的分辨率又要有足够的景深,这是传统光学硬件的矛盾. 解决此问题的一个有效方法是利用数字图像处理技术,对序列图像进行合成,即多层聚焦(multi-focus).

长期以来,人们一直致力于扩大显微镜的焦深技术的研究[2~4]. 基于空域的融合方法在处理离焦程度较大或透明显微图像时,块效应和重影现象明显,算法存在不足. 随着小波技术在图像处理中的广泛应用,小波变换的多尺度分析被成功

收稿日期: 2005-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60372017)

作者简介: 姜志国(1965-), 男, 吉林梨树人, 教授, jiangzg@buaa.edu.cn.

地应用于图像融合. 在不同的分辨率下,反映出不同的图像结构特征,使其在图像融合方面具有特殊的能力. 小波变换图像融合方法以往多用于多传感器获取图像的融合,在序列显微图像合成中的应用研究比较少见. 本文针对序列显微图像的特点,提出了一种基于区域小波变换的序列显微图像融合方案,以期解决空域融合算法存在的块效应和重影现象.

1 序列显微图像融合原理

序列显微图像融合的基本原理是:首先通过调整显微镜的 Z 轴位置,获取显微样本的序列图像(一般可采集几幅到几十幅图像),使整个序列覆盖物体在显微镜中的全部 Z 轴方向信息,每幅图像有聚焦清晰区域和模糊区域;然后在序列图像中通过一定的融合规则获取每一个像素位置对应的聚焦清晰部分从而重建出一幅每一景深部位均十分清晰的图像. 图 1 是序列显微图像融合基本原理图.

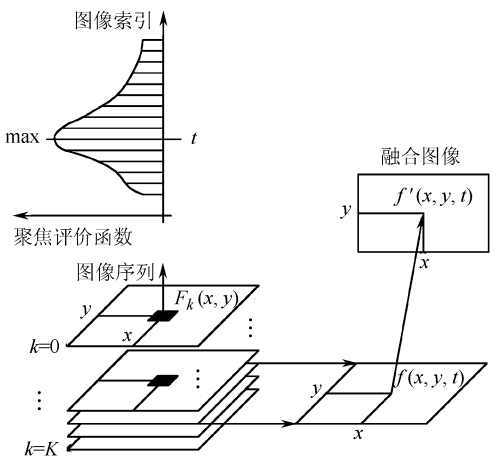


图 1 序列显微图像融合基本原理

2 空域融合算法综述

2.1 基于点处理的方法

简单的空域融合算子可以直接取每个像素灰度值最大或最小的序列层,以提取图像信号上的最大对比度特征,算法简单且易实现.

灰度平均法则直接取每个像素在所有序列图像中的平均值作为融合图像的像素值.

最大离差法首先计算序列中像素灰度的平均值 $\bar{I}_k(x,y)$,该值从一定程度上代表离焦量,然后选择与该平均值相差最大的像素作为融合图像的像素值. 该方法仅适用于景深相对较小的情况.

基于点处理的方法速度比较快,适用于简单、精度要求不高的图像融合.

2.2 基于区域处理的方法

简单的区域融合方法,同简单的基于点处理的方法一样,但此时的判断准则是在所选区域窗口内的最大、最小或取平均,窗口大小一般取 3×3 或 5×5.

灰度方差算子(local convariance),聚焦图像比离焦图像包含更多的灰度变化,因而图像灰度值的变化可以作为评价函数的依据. Tympel 提出了基于 5×5 窗口的区域方差算子[5].

基于 Sobel 梯度算子的 Tenengrad 函数方法,Sobel 梯度算子是一种一阶微分算子,常用来进行图像的边缘检测. 由于聚焦图像会有比较锐化的边缘,从而可以用 Sobel 算子作为序列图像融合算子[6].

改进拉普拉斯(SML, Sum-Modified-Laplacian)算子图像融合方法,二阶偏导可以获取高频分量,从而得到比较锐化的边缘,线性微分 Laplacian 算子可作为高频分量的估计量. 文献[7]使用一种改进拉普拉斯算子(SML operator)进行多层图像的处理,加入了可调的步长和阈值.

以往使用改进前的 Laplacian 算子进行图像处理时一般把 Laplacian 近似为一个 3×3 算子,考虑到显微图像的纹理变化,这里使用像元间的可变步长 S 来计算二阶差分. 即:

$$\begin{aligned} L(x,y) = {} & |2f(x,y) - \\ & f(x-S,y) - f(x+S,y)| + \\ & |2f(x,y) - f(x,y-S) - f(x,y+S)| \end{aligned} \quad (1)$$

取

$$F(i,j) = \sum_{x=i-N}^{i+N} \sum_{y=j-N}^{j+N} L(x,y) \qquad L(x,y) \geqslant T \quad (2)$$

N 决定了计算时使用的窗口的大小;T 为一个阈值,大于阈值的 Laplacian 值才参与汇总;$F(i,j)$ 即为 (i,j) 点的聚焦测度.

由于 Laplacian 算子是二阶差分,所以双倍加强了序列图像中的噪声影响. 适当地选取步长和阈值可以有效地滤除噪声,提高融合图像的质量.

2.3 空域融合算法存在的问题分析

空域融合算法(如改进拉普拉斯算子)具有在较好成像条件下融合后的图像十分清晰的特点,有效地用于显微图像焦深的扩展和显微表面三维成像[8]. 但是在有些情况下却存在明显的不足之处,在序列源图像中成像的效果相差过大,或序列源图像离焦程度比较大的情况下,融合后的目标图像会产生块效应,有时在物体四周产生一

些模糊的边缘和重影;而且对于透明的显微图像融合,块效应和重影现象更严重,效果不理想(见本文第 4 节的实验结果及分析).

分析其原因,空域算法在序列图像合成时,对处理层面的图像数据要么取,要么舍去,容易引入噪声的影响. 而对于透射光的显微图像,在整个成像光路上,不同层面的光强度对最后的成像都有贡献,采用空域算法简单的取或舍的合成,不符合透明显微图像的成像物理过程,容易产生方块效应和假轮廓.

小波变换在空域和频域同时具有良好的局部化特性,可以较好地保留多聚焦图像的高频信息,而且能从频域进行正交分解,从而可以聚焦到分析对象的任意细节[9]. 能保证有效地利用序列图像各层的有用信息,符合透明显微图像融合的物理过程,所以本文提出采用小波变换来解决序列显微图像的融合问题.

3　基于区域的小波融合算法

区域小波融合规则如图 2 所示,图中黑色点是待融合点,在处理图像时,不仅考虑黑色点位置的小波系数,还考虑了与它相邻位置的小波系数(图中阴影点). 这种基于区域的融合规则体现了图像像素与它相邻像素的相关性,因此,能够避免融合后图像的块效应和重影现象.

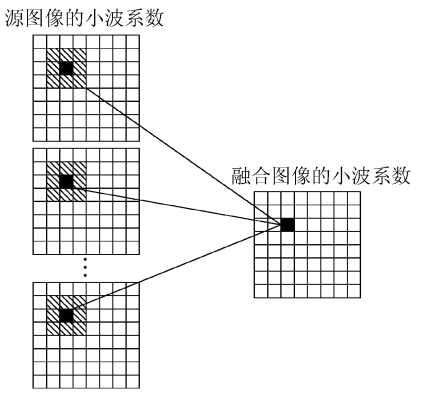


图 2　基于区域的融合规则

3.1　融合算子的确定

1) 低频融合算子

由于图像模糊表示其细节信息(或高频信息)丢失较多,相比之下,其整体信息(或低频信息)保持较好. 对同一目标或物体的多个信源图像来说,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,故融合之后的逼近系数可由序列图像低频系数的平均值来确定.

$$A_J = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} A_J^0(k)}{K} \tag{3}$$

其中　K 为图像序列的幅数.

2) 高频融合算子

在小波变换域内,分别对水平、垂直与对角分量进行处理. 这里不仅考虑相应位置的小波系数,还考虑与它相邻的小波系数,即把每一像素作为局部区域的中心,分别计算 3×3 或 5×5 窗口内的小波系数绝对值之和,再确定相应位置的小波系数. 把各尺度 $j(j=1 \sim J)$ 上对应位置的窗口内绝对值较大的系数作为重要小波系数保留下来.

$$D_J^i = \max_K \left\{ \sum_{m=-1}^{1} \sum_{n=-1}^{1} | D_J^i(x+m, y+n) | \right\} \tag{4}$$

其中　$i=1,2,3$ 分别表示水平、垂直与对角 3 个分量;$D_J^i(x,y)$ 表示序列中各幅图像在 (x,y) 位置 J 尺度各分量上的小波系数.

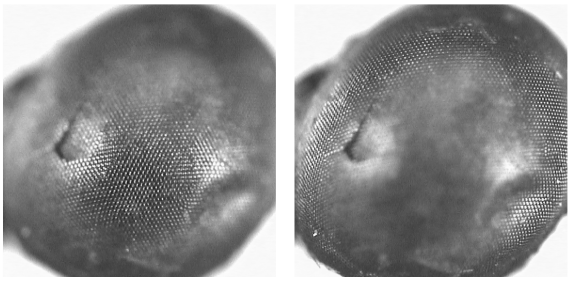
基于区域的融合算子相对于仅根据单一独立像素的简单选择来确定融合像素的方法来说,显得更合理、更科学. 实验也证明采用该融合算子取得了良好的视觉效果及融合质量.

除了上述区域融合算子外,还有其他一些融合算子如基于区域能量的融合算子、使用边缘提取的特征融合方法、基于小波变换方向性的融合方法等,但由于其运算量大,实际应用中不适合多幅序列图像的融合.

3.2　小波基的选取

与标准 FFT 变换相比,小波分析中所用到的小波基数具有不唯一性,即小波函数 $\psi(x)$ 具有多样性,所以除了融合算子的选择问题外,还有一个要解决的问题是小波基的选取问题.

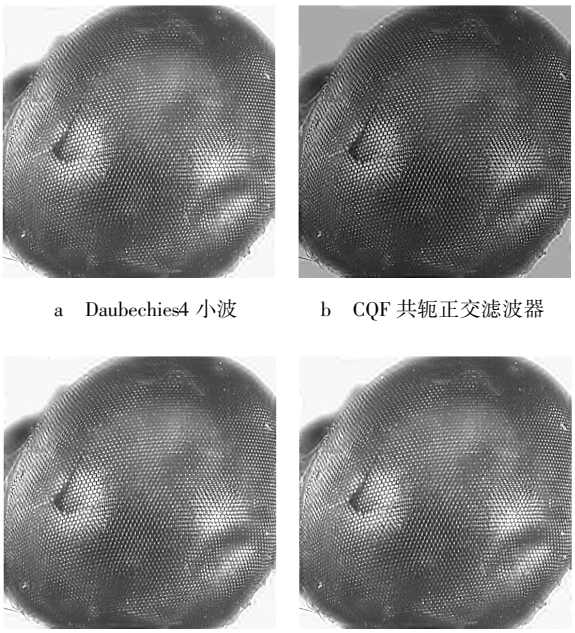
在序列图像融合实验中,选取几种典型小波基进行测试:Daubechies4 小波,CQF 共轭正交滤波器,钻石形滤波器(5 株排列),Db9/7 小波. 图 3 是各层离焦比较大的蝴蝶眼睛图像序列,采用



a　序列图像之第 1 幅　　b　序列图像之第 3 幅

图 3　蝴蝶眼睛序列显微图像
(采用反射光照明成像,共 5 幅图)

反射光照明成像,共5幅图像(本文只给出其中2幅),每幅图像尺寸:560×560×8 bit. 图4是选取不同的小波基对该序列图像的融合结果,从图中可以看出,Db9/7小波融合效果比较理想,适合多聚焦序列显微图像的融合.



a Daubechies4小波 b CQF共轭正交滤波器

c 钻石形滤波器 d Db9/7小波

图4 蝴蝶眼睛序列显微图像

3.3 边界延拓问题

在上面提到的小波算法中,都是假定数据是双向无限的. 但在实际的图像处理中,由于图像都是有限尺寸的,在把滤波器应用于边界时,存在如何处理边界的问题. 主要目的是要降低边界不连续性所产生的在边界上变换系数衰减慢的问题.

比较常用的方法有零延拓、边界重复延拓、周期延拓、对称周期和双对称延拓等. 前2种延拓方法过于粗糙,带来的失真很大,一般很少采用. 实验证明,对于所选择的小波基,周期延拓比对称延拓所重构的图像信噪比(S/N)大,随着分解级数增大,周期延拓重构图像的质量更为明显.

3.4 分解层数的选择

小波分解层数 J 的大小与所选用小波函数的光滑度有关,J 选择小,小波函数光滑度就差,但运算量小;J 选择大,小波函数光滑度就好,融合的频率范围越丰富,融合结果的细节也就越丰富. 实验证明选择 $J=3$ 或 $J=5$ 从恢复图像质量来看几乎没有差别,因此,选择 $J=3$ 即可以满足要求.

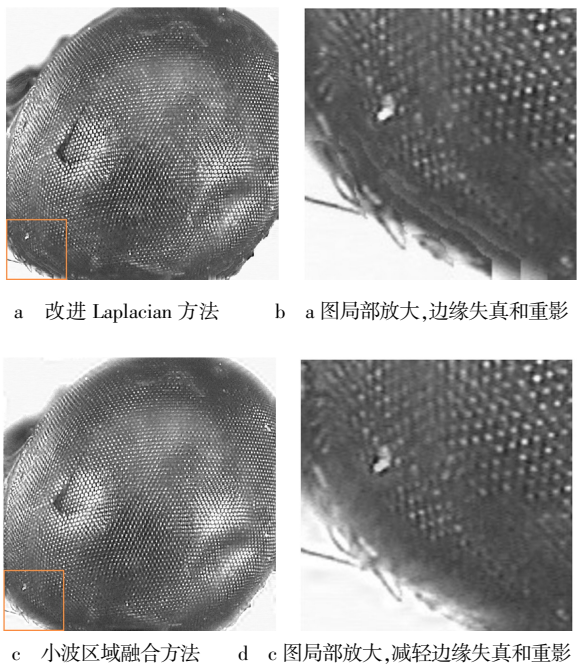
4 实验结果及分析

本实验针对序列显微图像融合问题,用本文设计的小波区域融合方法与空域融合效果比较好的改进Laplacian算子进行比较.

小波融合基本参数为:区域窗口大小为3×3;小波图像分解层数为3;选择双正交Db9/7小波基;边界延拓方式选择周期延拓.

具体实验采用本实验室数据库中近百幅序列显微图像进行了融合研究,下面取2个典型的图像序列为例,阐明实验结论.

图5是分别采用改进Laplacian方法和基于区域的小波融合方法对图3的5幅蝴蝶眼睛序列图像融合结果的比较.



a 改进Laplacian方法 b a图局部放大,边缘失真和重影

c 小波区域融合方法 d c图局部放大,减轻边缘失真和重影

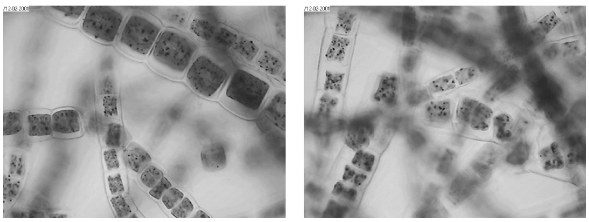
图5 蝴蝶眼睛序列图像融合结果

从图5中看到,在该组实验中,改进Laplacian方法融合后图像有比较明显的拼接痕迹,视觉效果不够理想,而且在物体四周有许多模糊的边缘,重影是由源图像的离焦引起的. 在显微系统中,离焦图像会在物体周围区域形成较大的模糊,融合后的图像中目标就会产生一个假轮廓. 此外,由于使用大窗口还会造成图像边缘失真和重影现象,图像存在方块效应.

小波区域融合方法得到的融合图像边缘连续,效果自然,没有明显的拼接痕迹,这主要是由于对不同分解层、不同频带分别进行融合处理,从而将来自多幅图像的细节信息有效地融合在一起. 该方法的缺点是融合后给图像整体带来一定的模糊效果.

另一组实验是针对透明图像的融合见图6(共3幅图,本文只到出其中2幅),在显微图像处理中,经常会遇到透射光下采集的图像,如生物

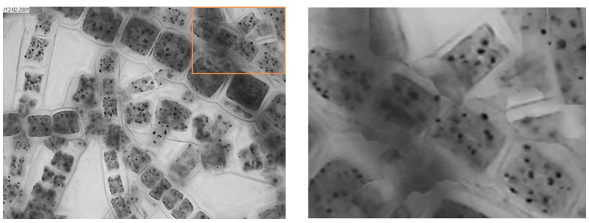
的一些细胞、组织等. 对于这一类图像,使用空域融合算子会产生严重的方块效应,而使用小波融合方法可以有效地解决上述问题. 图 7 是对图 6 序列透明图像融合结果的比较. 从图中可以看出,小波区域融合结果不存在拼接痕迹和假轮廓,明显优于 SML 算子融合结果.



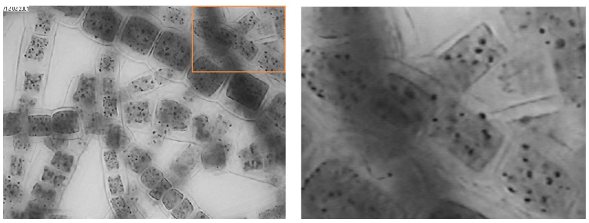
a　序列图像之第 1 幅　　b　序列图像之第 3 幅

图 6　序列显微透明图像

(采用透射光照明成像,共 3 幅图)



a　改进 Laplacian 方法　　b　a 图方块效应的放大



c　小波区域融合方法　　d　c 图局部放大,无拼接痕迹

图 7　序列显微透明图像融合结果

5　结　论

从上述实验结果和理论分析,对多聚焦序列显微图像的融合可以得出以下结论:①对于源图像离焦程度比较大,且图像之间相差也比较大的反射光成像融合时;②对于序列透明显微图像融合时,本文提出的基于区域的小波变换融合方法已没有明显拼接痕迹、假轮廓和块效应的特点而明显优于空域的融合方法.

参考文献 (**References**)

[1] Valdecasas A G, Marshall D. Extended depth-of-focus algorithms in brightfield microscopy[J]. Microscopy and Analysis, 2002, 29(9):13 ~ 15

[2] Hausler G. A method to increase the depth of focus by two step image processing[J]. Opt Commun, 1972, 38(6):38 ~ 42

[3] Sugimoto S A, Ichioka Y. Digital composition of images with increased depth of focus considering depth information[J]. Appl Opt, 1986, 24:2076 ~ 2084

[4] Subbarao M, Tao Choi. Accurate recovery of three-dimensional shape from image focus[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17: 266 ~ 274

[5] Asif M, Tae-Sun Choi. Learning shape from focus using multilayer neural networks[A]. SPIE[C], 1999,3811: 366 ~ 375

[6] Valdecasas A G, Marshall D. On the extended depth of focus algorithms for bright field microscopy[J]. Micron, 2001,32: 559 ~ 569

[7] Nayar S K, Nakagawa Yasuo. Shape from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 824 ~ 830

[8] 姜志国,史文华,韩冬兵,等. 基于聚焦合成的显微三维成像系统[J]. CT 理论与应用研究,2004,13(4): 9 ~ 15
Jiang Zhiguo, Shi Wenhua, Han Dongbing, *et al*. Three-dimensional microscopy image system base on depth from focus[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2004, 13(4): 9 ~ 15(in Chinese)

[9] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1999. 134 ~ 139
Yang Fusheng. Wavelet transform engineering analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1999. 134 ~ 139(in Chinese)