# 基于改进 NL-means 算法的显微 CT 图像降噪

李保磊 杨 民 李俊江

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

**摘 要**：显微 CT(Computed Tomography)采用微焦点射线源，射线剂量低，CT 图像噪声大，对其降噪十分必要. 综述了现存主要 CT 图像降噪算法及其优缺点，介绍了 NL(nonlocal)-means 算法，根据实验结果分析了其会在图像平滑区域引入人工伪影的不足. 根据 NL-means 算法的不足，在原算法中引入图像的梯度信息，提出了改进的降噪算法，改进算法保持了原算法优良的降噪功能，并能有效抑制人工伪影，且能够提高图像细节对比度，实验结果验证了改进算法的有效性.

**关 键 词**：显微 CT；降噪；人工伪影；改进 NL-means 算法；对比度

**中图分类号**：TP 391

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-00833-05

## Denoising of micro-CT image based on improved NL-means algorithm

Li Baolei Yang Min Li Junjiang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: Micro-CT(computed tomography)is based on microfocus X-ray source and the ray dose is low. So the noise level of micro-CT image is big and denoising of the CT image is very necessary. The current main denoising methods for CT image and their advantages and disadvantages were summaried. The NL(nonlocal)-means algorithm was described. According to the experiment result, the disadvantage of NL-meas algorithm that artificial artifact will be introduced in smooth region of CT image was analyzed. Based on the shortage of the NL-means algorithm, gradient information of image was introduced in the original algorithm and the improved algorithm was put forward. The improved algorithm keeps the excellent denioising function and the artificial artifact was restrained effectively. The detail contrast can be also enhanced. The availability of the improved algorithm was validated by the experiment result.

**Key words**: micro-CT(computed tomography); denoising; artificial artifact; improved NL(nonlocal)-means algorithm; contrast

显微 CT 作为一种新型的无损检测及评估技术，在航空航天微机电产品检测[1]、复合材料检测[2]、石油岩芯检测[3]等领域起着越来越重要的作用. 它通过对器件的断层层析来判断被检器件的内部微细结构、材质状况、有无缺陷、缺陷的性质和大小等. 显微 CT 采用微米级焦点的射线源，射线管功率较低，属于低剂量的射线成像，投影图像和 CT 图像均有较强的噪声，降低了成像的密度分辨率，同时也降低了显微 CT 的工程应用性. 因此对显微 CT 图像实施降噪是十分必要和关键的.

在现有文献中，抑制 CT 噪声的方法主要分为两类：一类是基于投影域的方法，一类是基于 CT 图像域的方法. 按照投影域和图像域分类主要是由于投影域的噪声是依赖于信号强度的乘性

**收稿日期**：2008-06-18

**资助项目**：北京市教育委员会共建项目专项资助项目；国家自然科学基金资助项目(60872080)；航天科技创新基金资助项目(CASC0410)

**作者简介**：李保磊(1980－)，男，山东菏泽人，博士生，baolei_li@yahoo.com.cn.

噪声,而CT图像域的噪声通常是近似于白噪声的加性噪声.

在投影域图像降噪方面,文献[4]通过研究投影数据,建立了一个相对精确的统计模型.研究表明,经过校正和取对数之后的投影数据不再满足复合泊松分布,而是满足一个方差依赖于信号强度的高斯分布,根据信号模型和贝叶斯公式以及最大后验估计标准,作者提出了一种惩罚似然估计的方法来平滑正弦图.文献[5]提出了在K-L域进行惩罚权重最小二乘估计的降噪方法,也取得了一定的效果.文献[6]提出利用各向异性扩散滤波抑制显微CT的噪声.上述降噪算法均须用到复杂的迭代运算,运算速度较慢,实用性不强,并且迭代算法易受数据噪声和初值影响.文献[7]提出了一种在投影域根据噪声的局部特性自适应的动态调整滤波器参数的滤波方法,可以有效抑制噪声和由于剂量过低引起的条状伪影.尤其对后者十分有效,实际上,该方法通过调整滤波参数使得在降噪和保持空间分辨率之间达成一个平衡.

在CT图像域降噪方面,由于其噪声模型一般表现为加性噪声,因此降噪方法较为丰富,但是能够有效保持空间分辨率的降噪方法并不多见,按空间域滤波和变换域滤波来分,空间域降噪算法主要包括均值滤波,高斯平滑滤波[8-9],中值滤波,加权中值滤波[10],全变分滤波[11]等;频率域算法主要包括频率域低通滤波,如Butterworth滤波器,以及基于小波变换的小波域滤波[12-14]等.还有一种称为邻域滤波的空间域算法[15-16],根据该算法,降噪图像中的一个像素的灰度值,由其与周围邻域像素灰度值的相似性来决定,简单说是由那些与其具有近似灰度的像素灰度值加权平均得到.实际操作中,可以设定权值,与目标像素灰度差别小的,设定比较大的权值,与目标像素灰度差别大的,设定较小的权值,最后加权平均得到目标像素的灰度值.此即为文献[15]于1985年提出的空间域邻域滤波方法.SUSAN滤波对上述滤波方法进行了改进[16],在权重计算过程当中加入了像素间的距离信息.实际上,两种方法的区别非常小,近似等效.

不论是投影域方法还是CT图像域方法,上述方法还不能在降低噪声的同时有效地保持图像的空间分辨率.而下述的NL-means算法在这方面表现出了优越的特性.

## 1 NL-means降噪算法及缺点分析

一幅图像中,总有许多冗余的信息,利用这些冗余信息去噪是一种典型的去噪思想,邻域滤波算法即基于此种思想,NL-means算法[17-19]的思想起源于邻域滤波算法,是对邻域滤波算法的一种推广,但是该方法的权值不再是由图像中的单个像素灰度值和其它像素作对比而得到,而是对像素周围整个区域的灰度分布做整体对比,根据灰度分布的相似性决定权值.如图1所示,虽然$p,q_1,q_2,q_3$具有相同的灰度,但是$q_1$和$q_2$的邻域灰度分布与$p$更接近,因此贡献较大的权值,而$q_3$对$p$则贡献较小的权值.显然,这使求得的权值相对邻域滤波算法更加合理.



图1 权值分布示意图

设$\nu$是噪声污染的图像,$\nu$定义在一个二维有界区域$\Omega\in R^2$,令$x\in\Omega$为图像中的一个像素.NL-means降噪算法如式(1)所示.

$$N(\nu)(x)=\frac{1}{C(x)}\times\int_{\Omega}\exp\left[-\frac{(G_a*|\nu(x+.)-\nu(y+.)|^2)(0)}{h^2}\right]\times\nu(y)\mathrm{d}y \tag{1}$$

式中,$G_a$为标准偏差为$a$的高斯卷积核;$h$是一个滤波参数,主要由图像的噪声标准差决定.另外

$$C(x)=\int_{\Omega}\exp\left[-\frac{(G_a*|\nu(x+.)-\nu(z+.)|^2)(0)}{h^2}\right]\mathrm{d}z \tag{2}$$

$$(G_a*|\nu(x+.)-\nu(y+.)|^2)(0)=\int_{R^2}G_a(t)|\nu(x+t)-\nu(y+t)|^2\mathrm{d}t \tag{3}$$

在离散域,给定一个离散图像$\nu=\{\nu(i),i\in I\}$,其中$I$为像素集合.NL-means算法的表达式如下:

$$N(\nu)(i)=\sum_{j\in I}w(i,j)\nu(j) \tag{4}$$

其中

$$w(i,j)=\frac{1}{Z(i)}\exp\left[-\frac{\|\nu(N_i)-\nu(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2}\right] \tag{5}$$

$$Z(i)=\sum_j \exp\left[-\frac{\|\nu(N_i)-\nu(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2}\right] \quad (6)$$

式中 $\|\nu(N_i)-\nu(N_j)\|_{2,a}^2$ 为像素 $i$ 和 $j$ 所在的两个邻域的基于灰度级的高斯加权欧氏距离.

对于算法的实际执行,还需要设置两个窗口尺寸,一个是像素邻域窗尺寸 $K\times K$,一个是像素邻域窗搜索范围的窗口大小 $L\times L$,即在 $L\times L$ 大小的区域里面选择像素的邻域大小为 $K\times K$ 执行 NL-means 算法,$K\times K$ 的窗口在 $L\times L$ 大小的区域里滑动,根据区域的相似性确定区域中心像素灰度的贡献权值. 如图 2 所示.

值得指出,依据算法原理,像素邻域及其搜索范围应是整幅图像,之所以选择此两窗口大小,是为了提高计算效率,如果在整个图像区域内计算,那么执行效率太低,工程实用性较差. 对于常见的噪声较大的图像,一般取 $K=7$,取 $L=21$ 就足够了[18],对于低噪声的图像 $K=3$,$L=7$ 基本就能满足降噪要求. $K$ 和 $L$ 可以根据图像噪声的水平而做适当调整.

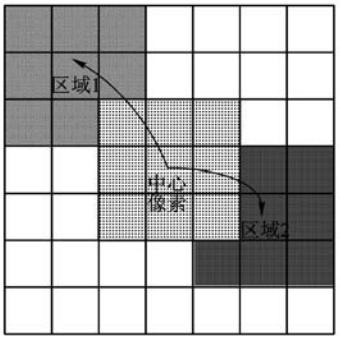
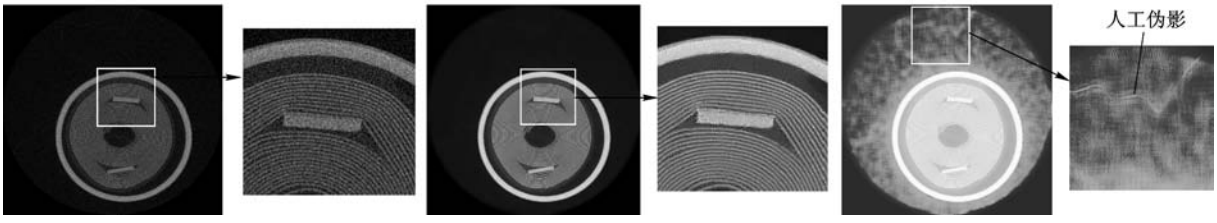



图 2　NL-means 算法执行过程示意图

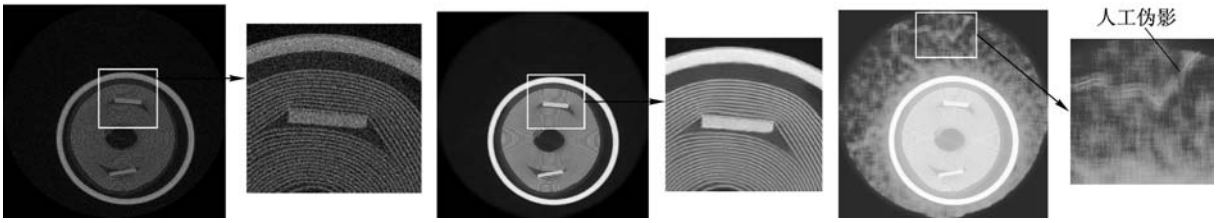
在算法中有两个待选参数:$a$ 和 $h$,参数 $a$ 由选定像素邻域的窗口大小决定,加高斯卷积核意味着距离中心像素越远,权值就会越小,反之则越大. 一般 $a$ 取邻域窗口大小的 1～10 倍. 而滤波参数 $h$ 由噪声的标准差决定,一般取噪声标准差 $\sigma$ 的 10～15 倍[18-19]. 运用此降噪方法对电容的显微 CT 图像降噪的实验结果如图 3～图 5 所示,选用窗口尺寸 $K=5$,$L=15$. 所有图像灰度均为映射到 0～255 范围内后(转化为. bmp 格式)进行处理的.

图 3～图 5 可见,NL-means 算法虽然有很好的降噪效果,但是有一个缺点,即会在图像的平滑区域引入人工伪影,为了突出人工伪影,对降噪图像进行了灰度均衡处理. 随着 $h$ 的增大人工伪影逐渐减弱,但是图像逐渐变得模糊,空间分辨率受到影响.



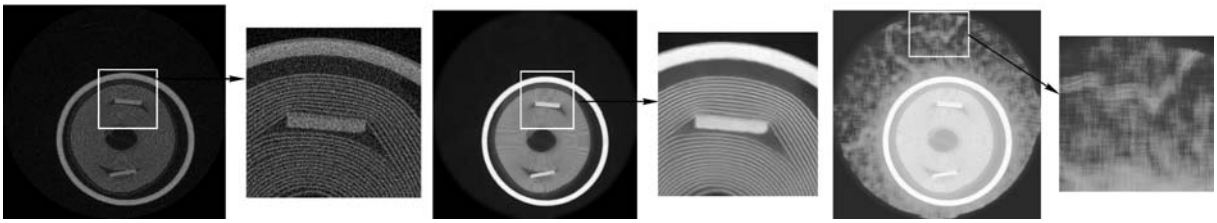

a　电容原始显微 CT 图像　　b　降噪图像　　c　降噪图像灰度均衡后的结果

图 3　$a=50$,$h=120$ 时电容 CT 图像 NL-means 方法降噪结果




a　电容原始显微 CT 图像　　b　降噪图像　　c　降噪图像灰度均衡后的结果

图 4　$a=50$,$h=180$ 时电容 CT 图像 NL-means 方法降噪结果



a　电容原始显微 CT 图像　　b　降噪图像　　c　降噪图像灰度均衡后的结果

图 5　$a=50$,$h=240$ 时电容 CT 图像 NL-means 方法降噪结果

## 2 改进 NL-means 降噪算法

针对 NL-means 算法的上述缺点，本文提出了改进的 NL-means 算法，图像降噪公式如下：

$$N(v)(x)=\frac{1}{C(x)}\int_{\Omega}\exp\{-[(G_a * |(v(x+.)-v(y+.))\times(\nabla v(x+.)-\nabla v(y+.))|^2)(0)]/h^2\}v(y)\mathrm{d}y \tag{7}$$

类似的，有

$$C(x)=\int_{\Omega}\exp\{-[G_a * |(v(x+.)-v(z+.))\times(\nabla v(x+.)-\nabla v(z+.))|^2)(0)]/h^2\}\mathrm{d}z \tag{8}$$

$$(G_a * |(v(x+.)-v(y+.))(\nabla v(x+.)-\nabla v(y+.))|^2)(0)=\int_{R^2}G_a(t)[(v(x+.)-v(y+.))(\nabla v(x+.)-\nabla v(y+.))]^2\mathrm{d}t \tag{9}$$

算法的离散域描述如下：

$$N(v)(i)=\sum_{j\in I}w(i,j)v(j) \tag{10}$$

$$w(i,j)=\frac{1}{Z(i)}\exp\{[-\|(v(N_i)-v(N_j))\times(\nabla v(N_i)-\nabla v(N_j))\|_{2,a}^2]/h^2\} \tag{11}$$

$$Z(i)=\sum_j\exp\{[-\|(v(N_i)-v(N_j))\times(\nabla v(N_i)-\nabla v(N_j))\|_{2,a}^2]/h^2\} \tag{12}$$

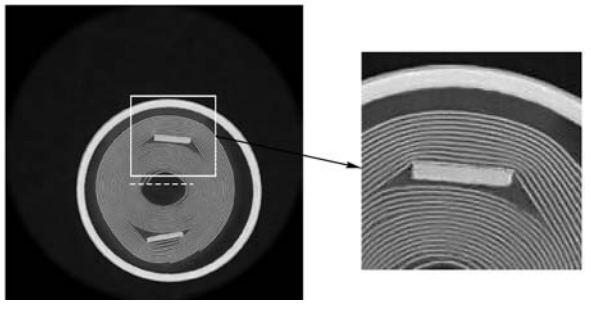
其中$\nabla v$为图像$v$的梯度图像. 即在算法中加入了梯度信息，这使得图像像素邻域之间的相关性下降，但是，在图像纹理丰富的地方，下降的幅度大，而在图像的平滑区域下降的幅度小，那么，加入梯度信息后，可以通过增大$h$，使得平滑处更加平滑，消除人工伪影，而图像纹理丰富的地方并未被模糊. 在实际操作中$\nabla v$可以利用具有抑制噪声效果的 sobel 算子来计算.

## 3 实验结果

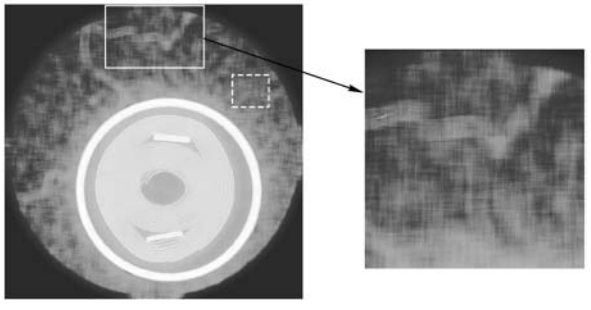
1) 实验 1

利用改进后的 NL-means 算法对上文中电容的显微 CT 图像进行降噪，实验结果见图 6. 此处设置 $a=50$，$h=9\,000$，$K=5$，$L=15$.

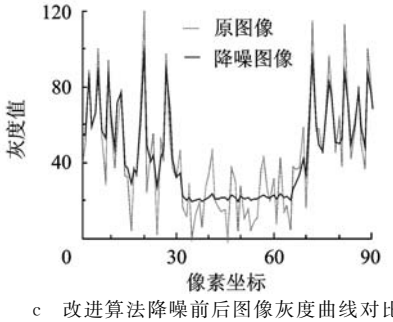
图 6c 中灰度曲线比较部分如图 6a 中水平虚线所示. 而降噪前后图 6b 中所示的背景区域(虚线方框内)的灰度标准差比较结果为：降噪前标准差为 8.14，降噪后标准差为 0.458. 可见，改进算法保持了原算法优良的降噪功能，且有效抑制了人工伪影. 改进的算法还有一个优点，即相对原算法，降噪后的图像在与原算法降噪图像具有相同幅度的人工伪影时，细节对比度更高，尤其对于低对比度的细节该效果更加明显. 分析其原因如下：采用原算法时，为了抑制人工伪影，需采用较大的 $h$ 值，这使得在对比度较低的细节处对比度下降，导致细节模糊，像质降低，而采用改进算法，由于加入了梯度运算，使得低对比度细节处的纹理信息更加明显，即使采用较大的 $h$ 值抑制人工伪影，仍然能保持细节信息. 验证结果见实验 2.



a 改进算法降噪图像



b 改进算法降噪图像灰度均衡结果




c 改进算法降噪前后图像灰度曲线对比

图 6 电容 CT 图像改进算法降噪效果

2) 实验 2

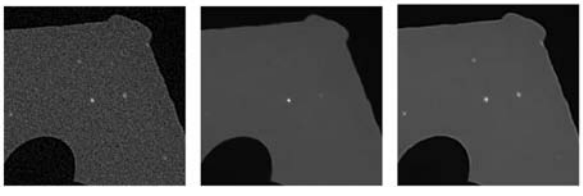
对某塑料件显微 CT 图像进行降噪，实验结果如图 7 所示，取 $K=5$，$L=15$. 在执行原始 NL-means 降噪算法时，取 $a=50$，$h=1\,800$. 在执行改进 NL-means 降噪算法时，取 $a=50$，$h=1\,500\,000$.

图 7d、图 7e、图 7f 分别为图 7a、图 7b、图 7c 中方框区域的图像. 图 7g 为原始 CT 图像、NL-

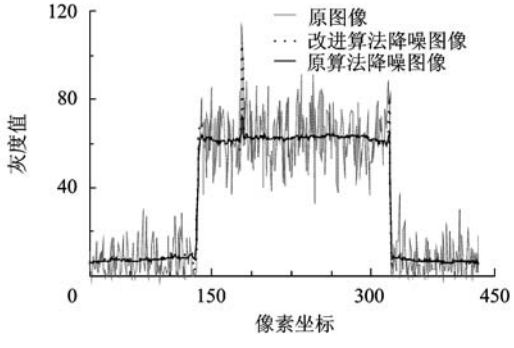
means 算法降噪图像和改进 NL-means 算法降噪图像某一行灰度曲线的比较图.



a　原图像　　b　原算法降噪图像　c　改进算法降噪图像



d　图 a 局部图像　　e　图 b 局部图像　　f　图 c 局部图像




g　图 7a～图 7c 某一行灰度曲线对比

图 7　改进 NL-means 算法对对比度的影响

根据以上实验结果可以看出,原算法和改进算法均有效地降低了显微 CT 图像的噪声,且改进算法相对原算法提高了图像的细节对比度.图像细节更加明显,边缘更加突出.

## 4　结 束 语

本文综述了现有 CT 图像降噪算法及其优缺点,深入研究了 NL-means 算法,针对该算法的不足,提出了一种改进的算法.改进算法相比原算法有两个方面的优点:可以在不损失空间分辨率的情况下抑制人工伪影;改进算法降噪后的图像在与原算法降噪图像具有相同幅度的人工伪影时,细节对比度更高.

### 参考文献(References)

[1] Li Yawwen, Liang Zhuang. A new method for nondestructive internal microtomography of IC and vacuum microelectronic devices[C]//Proceedings of 14th Int. Vacuum of Microelectronics Conference. Davis: IEEE,2001:15－16

[2] Wevers M, Meester P DE. Microfocus X-ray computer tomography in materials researh[C]//15th World Conference of NDT. Roma:AIPnD,2000:899－906

[3] 李玉彬,李向良,姜燕梅. 微焦点 X 射线 CT 及其在无损检测中的应用[J]. 无损检测,1999,21(12):549－552
Li Yubin, Li Xiangliang, Jiang Yanmei. X-ray computed microtomography and its application to NDT[J]. NDT,1999,21(12):549－552(in Chinese)

[4] Li Tianfang, Li Xiang, Wang Jing, et al. Nonlinear sinogram smoothing for low-dose X-ray CT[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,2004,51(5): 2505－2513

[5] Lu H, Li X, Hsiao I T, et al. Analytical treatment of noise for low-dose CT projection data by penalized weighted least-square smoothing in the K-L domain[J]. SPIE Med Imag, 2002,4682:146－152

[6] Demirkaya K. Reduction of noise and image artifacts in computed tomography by nonlinear filtration of the projection images[J]. SPIE Med Imag,2001,4322:917－923

[7] Hsieh J. Adaptive streak artifact reduction in computed tomography resulting from excessive X-ray photon noise[J]. Med Phys, 1998, 25:2139－2147

[8] Babaud J, Witkin A, Baudin M, et al. Uniqueness of the Gaussian kernel for scale space filtering[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1986, 8:26－33

[9] Lindenbaum, Fischer M, Bruckstein A M. On Gabor contribution to image enhancement [J]. Pattern Recognition, 1994, 27:1－8

[10] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社,2007
Ruan Qiuqi. Digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2007(in Chinese)

[11] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1－4):259－268

[12] Chang S G, Yu B, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9): 1532－1546

[13] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613－627

[14] Pan Q, Zhang L, Dai G, et al. Two denoising methods by wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999,47(12): 3401－3406

[15] Yaroslavsky L P. Local adaptive image restoration and enhancement with the use of DFT and DCT in a running window[C]//Wavelet Applications in Signal and Image Processing IV. Bellingham,WA:SPIE,1996,2825:1－13

[16] Smith S M, Brady J M. SUSAN:a new approach to low level image processing[J]International Journal of Computer Vision,1997,23(1),45－78

[17] Buades A, Coll B, Morel J M. Nonlocal image and movie denoising[J]. Int J Comput Vis,2008,76:123－139

[18] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a newone, multiscale model[J]. Simul, 2005,4:490－530

[19] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//IEEE International Conference on Computervision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005,2:60－65

(责任编辑:文丽芳)