

# 基于三维加权和双域滤波的螺旋 CT 伪影校正

牛晓伟<sup>1,2</sup>, 孔慧华<sup>1,2</sup>, 邝云霞<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 数学学院, 太原 030051; 2. 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 螺旋 CT 重建会受到锥束伪影和风车伪影的影响, 锥束伪影是由于锥角和螺距过大而导致的, 而风车伪影由纵向方向采样不足引起, 为了降低锥束伪影与风车伪影对 CT 图像的影响, 提出一种螺旋 CT 伪影校正算法: 首先采用三维加权螺旋 FDK 算法进行重建, 有效去除重建图像中的锥束伪影, 然后采用改进的双域滤波算法对含风车伪影图像进行校正; 三维加权螺旋 FDK 算法通过对大锥角的射线给予不利权重来抑制锥束伪影, 改进的双域滤波算法可以在去除风车伪影的同时保留更多的细节; 计算机仿真实验结果表明, 该算法能有效地抑制重建图像中的锥束伪影和风车伪影, 提高 CT 图像的质量。

**关键词:** 螺旋 CT; 三维加权; 双域滤波; 锥束伪影; 风车伪影

## Helical CT Artifact Correction Based on 3D Weighting and Dual Domain Filtering

NIU Xiaowei<sup>1,2</sup>, KONG Huihua<sup>1,2</sup>, DI Yunxia<sup>1,2</sup>

(1. School of Mathematics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Helical CT reconstruction is affected by the artifacts of cone beam and windmill, cone beam artifacts are caused by excessive cone angle and pitch, and windmill artifacts by insufficient sampling in the longitudinal direction. In order to reduce the effects of cone beam artifacts and windmill artifacts on CT images, a helical CT artifact correction algorithm is proposed; Firstly, a 3D weighted helical FDK algorithm is used for the reconstruction to effectively remove cone beam artifacts from the reconstructed images. Then an improved dual-domain filtering algorithm is used to correct the images containing windmill artifacts; The 3D weighted helical FDK algorithm suppresses cone beam artifacts by using unfavorable weights to rays with large cone angles, and the improved dual-domain filtering algorithm can preserve more details while removing windmill artifacts; The simulation results show that the algorithm can effectively suppress cone beam artifacts and windmill artifacts in the reconstructed images, which improves the quality of CT images.

**Keywords:** helical CT; 3D weighted; dual-domain filtering; cone beam artifact; windmill artifact

## 0 引言

螺旋计算机断层扫描技术 (CT, computed tomography) 自问世以来, 具有了更快的扫描方式和更高的轴向分辨率, 而越来越多的高分辨率锥束探测器需要使用专用的三维锥束重建算法, 以提供更好的图像质量, 螺旋 CT 已经广泛应用在了工业无损检测、临床诊断等领域<sup>[1-3]</sup>。螺旋 CT 的扫描轨迹是边旋转边平移, 即螺旋扫描轨迹, 扫描模式中的视角实际上是分布在一条三维曲线上, 给定一定数量的视角, 视角的取样密度取决于沿  $z$  轴方向的几何覆盖,  $z$  方向的覆盖范围越长, 视角的采样密度就越低。

对于目前的单源多排探测器 CT (MDCT, multi-row detector CT) 扫描仪, 螺距通常被限制在 1.5 以下, 这种限制是由于如果使用目前最先进的重建算法来重建图像,

螺距大于 1.5 时就会出现图像伪影。因此, 在高螺距螺旋 CT 重建问题中存在两个内在的科学挑战: 一是角度样本区间大, 如圆形扫描中的视角欠采样重建问题; 二是视角范围被截断, 如有限视角重建问题。也就产生了两类图像伪影: 有限视角伪影和沿  $z$  轴方向的数据不一致造成的伪影, 这些伪影基本上都是由扫描的三维性质和近似算法的使用引起的<sup>[4-5]</sup>。

锥束伪影是螺旋 CT 中常见的一种伪影, 产生的一个根本原因是锥角和螺距过大而引起的共轭射线不一致, 并且伪影会随着重建平面与中心平面之间的距离增大而变严重<sup>[6-7]</sup>。螺旋 FDK 算法需进行投影数据重排为平行数据, 这会降低空间分辨率, 造成损失, 仅在锥角很小时比较有用, 无法在锥角或螺旋间距增加的情况下提供可接受的重建精度。Balogh 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于统计的迭代环去除算

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-10-31。

基金项目: 国家自然科学基金(61801437, 61871351, 61971381); 山西省基础研究计划资助项目(202103021224190)。

作者简介: 牛晓伟(1997-), 男, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事图像处理与图像重建方向的研究。

通讯作者: 孔慧华(1977-), 女, 山西太原人, 博士, 副教授, 主要从事图像处理与图像重建方向的研究。

引用格式: 牛晓伟, 孔慧华, 邝云霞. 基于三维加权和双域滤波的螺旋 CT 伪影校正[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 246-251.

法, 有效地检测和校正投影数据中的错误像素值, 而不会在重建图像中造成新的伪影, 可以去掉缺陷检测单元产生的环伪影。Han 等<sup>[9]</sup>提出了一种在圆轨道锥束 CT 系统中减少锥束伪影的双能方法, 可以有效恢复扭曲的骨性结构和强度值, 尤其在大锥角区域。Tang 等<sup>[7]</sup>基于圆柱形探测器, 提出了一种三维加权 (3D, three-dimensional) 螺旋 FDK 重建算法, 可以在中等锥角和大螺距下显著提高重建的精度。Kong 等<sup>[10]</sup>基于平板探测器, 将锥形束数据转换为锥形平行几何体, 提出了一种 3D 加权螺旋 PFDK 算法, 在锥角和螺距较大时可以提供良好的重建结果。Magkos 等<sup>[11]</sup>调整 CT 轨迹的直接迭代重建算法来估计锥束伪影并对其进行补偿, 产生了质量更高的重建体积。

而风车伪影是由  $z$  轴方向采样不足引起的, 常出现在  $z$  轴解剖结构和密度变化很大的部位, 在其重建图像上围绕中心点呈黑/白图案组成风车状的伪影, 尤其是在其他参数保持一定的情况下, 重建图像中风车伪影的严重程度与螺距的大小成正比, 准直器层越厚风车伪影就越严重<sup>[5,11]</sup>。针对螺旋 CT 存在的风车伪影问题, 可以通过提高  $z$  轴方向的采样率得到改善, 人们提出了各种方法来减少风车伪影或提高纵向分辨率, 这些方法可分为三类: 正弦图上采样、超分辨率重建和图像后处理。李嫣嫣等<sup>[12]</sup>提出一种结合黄金角变密度螺旋采样、并行成像和基于同伦  $l_0$  范数最小化的压缩感知的图像重建的三维动态磁共振成像方法, 可以提高欠采样率, 实现较高的空间分辨率和时间分辨率。减少风车伪影最常用的方法之一是改进 CT 系统硬件中的纵向采样, 如德国西门子公司的  $z$  轴动态飞焦技术 ( $z$ -FFS,  $z$ -Flying Focal Spot) 利用焦斑在纵向上的周期性运动将同时获取的切片数量增加一倍, 以提高纵向分辨率和减少风车伪影<sup>[13]</sup>。Brown 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于图像域总方差最小化的风车伪影抑制方法, 该方法能够去除风车伪影, 同时保持图像中解剖结构的分辨率。Shi 等<sup>[15]</sup>采用改进的低秩和全变分正则化从低分辨率图像中初步恢复细节和边缘, 然后将高分辨率图像与受风车伪影影响的原始重建图像相结合, 可以获得更准确的图像。黄铜港等<sup>[16]</sup>提出一种基于双域滤波与距离变换的算法对风车伪影图像进行校正, 能够在校正风车伪影的同时较好地保留原始螺旋 CT 图像中的细节信息。

上述方法在一定程度上解决了螺旋 CT 重建中锥束伪影和风车伪影的影响, 但是都有一定的局限性, 例如, 部分投影数据由于消除数据冗余而被浪费, 噪声特性或剂量效率降低; 空间分辨率下降, 因为必须沿  $z$  方向至少执行一次插值; 由于拉东平面或 Tam 窗的参与导致不可接受的时间分辨率。但高螺距螺旋扫描在临床实践中是非常必要的, 比如, 选择高螺距扫描可以减少病人辐射剂量, 可以提高重建图像质量等等。因此本文提出使用三维加权螺旋 FDK 算法<sup>[6]</sup>和改进的双域滤波算法<sup>[17-19]</sup>对螺旋 CT 图像进行重建和校正, 双域滤波可以在保留更多细节的同时保留边缘等高对比度特征, 因此能有效解决上述问题并在较大

的锥角和螺距下保持更好的图像质量。

## 1 理论与方法

### 1.1 基于 3D 加权的锥束伪影去除

螺旋 CT 中, 随着锥角和螺距的增大, 重建图像质量变差, 这是由于重建时共轭射线不一致引起的。X 射线在机架内旋转  $180^\circ$  后, 可以获得相同方向的 X 射线, 此射线就被称为共轭射线, 且两条射线的投影会存在差异, 这种差异我们通常称为共轭射线不一致。如图 1 所示, 给定一个要重建的点  $P(x, y, z)$  和一条穿过它的射线  $SP$  (即直射射线), 那么就存在一条也穿过点  $P$  并与其对应的共轭射线  $S'P$ , 其中  $\alpha$  和  $\alpha_c$  分别对应直射射线和共轭射线的锥角。由于直射射线的锥角不等于共轭射线的锥角, 因此如果重建的平面离中心平面越远, 重建图像的质量就会越差。Patch (2004) 提出了一种 3D 权重, 用于抑制原生锥束几何体中锥束重建的伪影, 其对一对共轭射线中锥角较小的射线给予有利权重, 并对锥角较大的射线给予不利权重, 便可以提高螺旋重建精度。基于这一情况, 下面给出了一种基于平板探测器的 3D 加权螺旋 FDK 重建算法<sup>[10]</sup>。

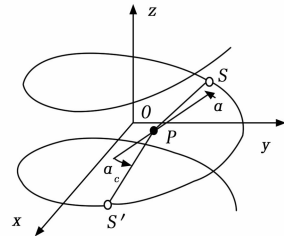


图 1 螺旋 CT 投影数据中一对共轭射线的示意图

首先给出二维加权 (2D, two-dimensional) FDK 算法, 在 2D 加权的基础上考虑锥角的影响, 再给出一种 3D 加权算法, 从而得到一种 3D 加权 FDK 算法:

$$\tilde{f}(x, y, z) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \omega_{2D}(\theta, l) \tilde{P}^{PF}(\theta, l(x, y, \theta), v(x, y, z, \theta)) d\theta \quad (1)$$

$$\omega_{2D}(\theta, l) = \frac{c(\theta)}{c(\theta) + c(\theta \pm \pi)} \quad (2)$$

$$c(\theta) = \begin{cases} \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{(\theta_{\min} + \delta) - \theta}{\delta}\right), & \theta_{\min} \leq \theta < \theta_{\min} + \delta \\ 1, & \theta_{\min} + \delta \leq \theta < \theta_{\max} - \delta \\ \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta - (\theta_{\max} - \delta)}{\delta}\right), & \theta_{\max} - \delta \leq \theta < \theta_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\theta$  表示扫描视角,  $l$  是射线源到旋转中心的距离,  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  是视角范围并满足  $\pi + 2\alpha_{\max} \leq \theta_{\max} - \theta_{\min} \leq 2\pi$ ,  $\tilde{P}^{PF}(\theta, l, v)$  表示预加权和滤波后的投影数据,  $\omega_{2D}(\theta, l)$  是 2D 加权函数。2D 加权螺旋 FDK 算法不仅能处理部分扫描, 还能抑制因螺旋数据采集不一致而造成的螺旋伪影。2D 加权螺旋 FDK 算法可以抑制由射线冗余引起的伪影, 当锥角或螺距较小时, 该算法可以获得满意的重建结果。由于没

有考虑到每条射线的锥角影响，随着锥角或螺距的增加，2D 加权螺旋 FDK 算法不再能提供可接受的重建精度。

然后将预加权和过滤后的投影进行反投影来重建图像，在图 1 所示的锥形平行几何中，3D 加权螺旋 FDK 重建算法的解析表达式为：

$$\tilde{f}(x, y, z) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \omega_{3d}(\theta, l, \alpha) \tilde{P}^{PF}(\theta, l(x, y, \theta), v(x, y, z, \theta)) d\theta \tag{4}$$

$$\omega_{3d}(\theta, l, \alpha) = \frac{\omega_{2D}(\theta, l) \tan^{kh}(\alpha_c)}{\omega_{2D}(\theta, l) \tan^{kh}(\alpha_c) + \omega_{2D}(\theta_c, -l) \tan^{kh}(\alpha)} \tag{5}$$

其中：式 (5) 是 3D 加权函数， $k$  是一个随螺距变化的参数。并且加权函数  $\omega_{3d}(\theta, l, \alpha)$  满足：

$$\omega_{3d}(\theta, l, \alpha) + \omega_{3d}(\theta_c, -l, \alpha_c) = 1 \tag{6}$$

2D 加权函数可以抑制由射线冗余引起的伪影，而 3D 加权函数可以抑制由锥角和螺距过大引起的伪影。

### 1.2 基于双域滤波的风车伪影去除

双域滤波包括双边滤波和短时傅里叶变换 (STFT, short-time fourier transform) 两个部分，其主要思想是将图像分为两个层次，包括基础层和细节层，其中基础层具有高对比度的特点，可以采用空间域的算法进行处理，细节层具有低对比度的特点，能采用变换域的算法进行处理。它是在空间域使用双边滤波，可以保留边缘等高对比度特征，在变换域使用带小波收缩的 STFT，可以很好的保留细节，将空间域和变换域结合到一起比单独使用其中一种效果更好<sup>[17]</sup>。而螺旋 CT 的螺距值越大，螺旋扫描一周所涉及的用于重建的探测器排数就越多，重建图像中的风车伪影也会变严重。首先输入一幅含有风车伪影的图像  $f$ ，同时将中间去噪图像作为导引图像来继续后面的迭代，用于调整 STFT 的系数，并且随着迭代的增加使得噪声越来越小，不断逼近原始图像。双域去噪采用三步迭代进行，三次迭代以后，引导图像逐渐逼近原始干净图像。去噪算法的模型可以定义为：

$$f = g + \eta \tag{7}$$

式 (7) 中  $f$  表示含风车伪影的图像， $g$  表示原始图像， $\eta$  表示方差为  $\sigma^2$  的加性噪声。双域滤波算法的目标是从噪声污染图像  $f$  来估计原始图像  $g$ 。以下是对双域滤波算法的双边滤波、STFT 和小波收缩的详细介绍。

#### 1.2.1 双边滤波

双边滤波是一种非线性滤波器，仅是在局部邻域样本的加权平均值，其中权重是基于中心样本和相邻样本之间的空间和辐射距离计算的，通过这种方式，边缘得到很好的保留，而噪声被平均化。它需要对导引图像和含风车伪影的图像同时进行双边滤波，定义了一个正方形窗口  $N_p$ ， $N_p$  以像素  $p$  为中心， $r$  为半径，导引图像和含风车伪影图像像素点  $p$  双边滤波后的高对比度值为：

$$\tilde{g}_p = \frac{\sum_{q \in N_p} t_{p,q} g_q}{\sum_{q \in N_p} t_{p,q}} \tag{8}$$

$$\tilde{f}_p = \frac{\sum_{q \in N_p} t_{p,q} f_q}{\sum_{q \in N_p} t_{p,q}} \tag{9}$$

$$t_{p,q} = e^{-d(p,q)/2\sigma^2} e^{-(g_p - g_q)^2 / \gamma_r \sigma^2} \tag{10}$$

其中： $p$  和  $q$  表示图像像素点， $d(p, q)$  表示像素点  $p$  和  $q$  邻域之间的欧氏距离， $\tilde{g}_p$  和  $\tilde{f}_p$  分别为导引图像和含噪图像像素点  $p$  去噪后的高对比度值， $t_{p,q}$  为双边滤波核函数，参数  $\sigma_s$  和  $\gamma_r$  分别表示空间核和像素值核， $\sigma$  为平滑参数，用来对不同强度的噪声去噪。

双边滤波的边缘保护特性是因为使用了范围核（以及空间核），用于控制边缘附近的扩散，并且空间核和距离核都是高斯函数。其中强烈的不连续性通常发生在边缘附近，这由范围核处理，然后用于抑制空间的扩散。另一方面，范围核在强度平滑变化的区域中变得不起作用，然后空间核进行处理。双边滤波器作为标准的扩散滤波器，空间核和范围核一起在均匀区域中执行平滑，并同时保留边缘。

#### 1.2.2 STFT

通过式 (8)、(9) 得到了图像的基础层，然后将图像信息从空间域转换到频域，即将原图像分别减去导引图像和含噪图像的高对比度去噪图像来得到各自的低对比度图像，然后进行 STFT，为小波收缩做准备。以时间信号为例，短时傅里叶变换就是对信号先乘以仅在一段时间（图像信号是空间）上不为零的窗函数，然后对加窗的函数进行傅里叶变换。STFT 所得系数  $G_{p,v}$  和  $S_{p,v}$  的自变量为频率  $v$ ，定义域为频率窗口  $V_p$ ，该窗大小与  $N_p$  相同。分别得到它们的傅里叶系数  $G_{p,v}$ 、 $S_{p,v}$  及方差为：

$$G_{p,v} = \sum_{q \in N_p} e^{-i2\pi(q-p) \cdot f / (2r+1)} t_{p,q} (g_q - \tilde{g}_p) \tag{11}$$

$$S_{p,v} = \sum_{q \in N_p} e^{-i2\pi(q-p) \cdot f / (2r+1)} t_{p,q} (f_q - \tilde{f}_p) \tag{12}$$

$$\sigma_{p,v}^2 = \sigma^2 \sum_{q \in N_p} t_{p,q}^2 \tag{13}$$

STFT 步骤加强了中心部分的细节特征，它每次迭代噪声都会减少，而只会引入很少的偏差，在进行离散傅里叶变换时需要执行加窗操作，是为了避免图像边缘出现新的伪影。双边滤波核采用了高斯函数，STFT 过程就等同于对低对比度图像进行了 Gabor 变换。

#### 1.2.3 小波收缩

采用小波收缩因子  $K_{p,v}$  来调整含噪 STFT 的系数  $S_{p,v}$ ，它使用与式 (10) 中双边滤波器的范围核类似的收缩因子，并且范围核被设计为保留接近零的均值噪声并丢弃偏置诱导信号。然后使用了欧式距离的倒数来  $\frac{\sigma_{p,v}^2}{|G_{p,v}|^2}$  构成小波收缩因子用以收缩修改后像素块的傅里叶系数，表示为：

$$K_{p,v} = e^{-\gamma_f \sigma_{p,v}^2 / |G_{p,v}|^2} \tag{14}$$

其中： $\gamma_f$  表示小波收缩因子调整参数，通过对  $G_{p,v}$  构造的小波收缩系数  $K_{p,v}$ ，对  $S_{p,v}$  收缩得到低对比度值，将细节信号的信息反变换回空间域，即：

$$\tilde{F}_p = \frac{1}{|M_p|} \sum_{v \in V_p} K_{p,v} S_{p,v} \tag{15}$$

其中:  $M_p$  为  $S_{p,v}$  对应的频率分布矩阵,  $|M_p|$  为  $M_p$  中的元素个数。那么, 对于双域滤波从含噪图像  $f$  还原未知图像  $g$ , 便可以合理估计为:

$$g = \tilde{f} + \tilde{F} \quad (16)$$

其中:  $\tilde{f}$  为高对比度基础层去噪图像,  $\tilde{F}$  为低对比度细节层去噪图像。

双边滤波核掩盖了可能导致小波收缩振铃的高对比度边缘, 而局部傅里叶变换检测并保留了双边滤波核可能会模糊的低对比度重复结构, 实现起来较为容易。

### 1.2.4 改进的双边滤波核函数

双域滤波算法经过多次迭代会造成时间过长, 并且将原始含风车伪影图像作为引导图像来进行下一步迭代, 当风车伪影过于严重时, 需要增强双域滤波的强度, 进而会造成图像细节的消失和边缘部分变得模糊。

式 (10) 中的  $d(p,q)$  指的是像素间的欧氏距离, 用来度量邻域间的相似性。当伪影过于严重时, 对于结构和细节信息比较丰富和复杂的区域, 由于欧氏距离较大就会导致相似度低的邻域被赋予较大的权重。此时, 欧氏距离就不能较好的反映邻域间的相似性, 达不到抑制风车伪影同时保留细节信息的目的。本文将欧氏距离改为汉明距离来度量邻域间的相似性, 公式如下:

$$t_{p,q} = e^{-L(p,q)/2d^2} e^{-|g_p - g_q|^2/\gamma\sigma^2} \quad (17)$$

其中:  $L(p,q)$  指的是像素  $p,q$  邻域之间的汉明距离。两个向量  $x,y \in \{0,1\}^n$  之间的汉明距离定义为:

$$L(x,y) = \sum_{k=1}^n (x \oplus y) \quad (18)$$

其中:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, \oplus$  为模 2 加运算<sup>[20]</sup>。

改进后的双域滤波可以选取更小的  $\sigma$  值进而能有效避免原始双域滤波的局限性。

## 2 实验结果

### 2.1 实验设置

本研究的主要目的是去除锥束伪影和风车伪影, 将通过仿真实验验证提出算法的有效性。文中所有算法都在 MATLAB 和 C++ 的混合模式下实现, 接口在 MATLAB 中, 大规模计算全部都在 C++ 中。实验中, CT 系统的扫描方式为螺旋扫描, 射线源到旋转中心的距离为 200 mm, 探测器为平板探测器, 探测器到旋转中心的距离为 50 mm, 探测器单元尺寸为 1 mm×4 mm, 探测器阵列大小为 350×20, 扫描的圈数为 3 圈, 每圈均匀采样, 并且每圈采集的投影数为 360, 重建图像尺寸为 256×256×256。实验分别对相同材料和不同材料的植入物进行了研究, 并同时采用原始双域滤波算法对伪影进行校正, 用于与本文所提算法进行对比。本文所有实验中双域滤波均进行 3 次迭代。图 2 是对不同材料植入物编号的示意图。

图 2 的模型植入物参数见表 1。

表 1 中,  $A$  为植入物的灰度值,  $O$  为植入物的中心坐标,  $a, b, c$  分别为植入物在  $X, Y, Z$  轴方向上的半轴长系数。

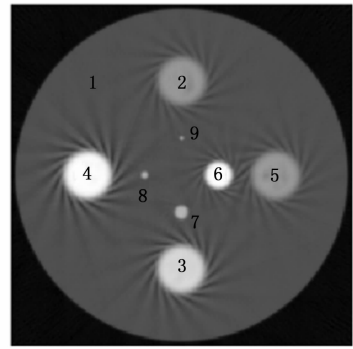


图 2 不同材料植入物编号

表 1 模型植入物参数

序号	参数				
	$A$	$O$	$a$	$b$	$c$
1	0.201 8	(0,0,0)	0.99	0.99	0.99
2	0.452 1	(0,0.55,0)	0.35	0.35	0.20
3	0.210 4	(0,-0.55,0)	0.35	0.35	0.20
4	0.352 7	(-0.55,0,0)	0.35	0.35	0.20
5	0.203 9	(0.55,0,0)	0.35	0.35	0.20
6	0.448 9	(0.216 5,0,0)	0.20	0.20	0.20
7	0.256 8	(0,-0.216 5,0)	0.10	0.10	0.20
8	0.256 8	(-0.216 5,0,0)	0.05	0.05	0.20
9	0.256 8	(0,0.216 5,0)	0.025	0.025	0.20

### 2.2 实验分析

图 3、4、5 为同种材料的植入物在螺距为 1 时第 107 层、105 层和 104 层的重建图像与校正图像,  $\sigma$  为双域滤波的参数值。第一列是 3D 加权螺旋 FDK 算法重建图像, 由于重建图像的锥角依次增大, 扫描对象结构变窄, 图像沿旋转轴的欠采样而遭受到更严重的风车伪影; 第二列是螺旋 FDK 算法的重建图像, 由于其忽略了直射射线和共轭射线之间的锥角差异, 因此图像中还出现了较为明显的锥束伪影, 并且随着锥角的增大, 图像中的锥束伪影也随之增加, 严重影响了 CT 图像的质量; 第三列是经过 3D 加权和原始双域滤波的校正图像, 由于图 5 (a) 的风车伪影过于严重, 图 5 (c) 的去噪图像需要增加双域滤波的强度, 虽然可以去除一部分风车伪影, 却造成了边缘和细节信息的丢失, 并且伪影仍有残留; 第四列是本文算法处理后的重建图像, 图 5 (d) 不仅可以去除大部分的锥束伪影和风车伪影, 并且保留了更多的细节和边缘信息, 效果要比图 5 (c) 好。可以看到, 图 5 (c) 和图 5 (d) 的  $\sigma$  值分别为 0.019 8 和 0.000 15, 图 5 (d) 的双域滤波强度远远小于图 5 (c), 因此可以避免图像变得模糊。

图 6、7、8 为同种材料植入物 105 层切片在螺距为 0.75、1 和 1.25 下的重建图像与校正图像。第一列是采用 3D 加权螺旋 FDK 算法的重建图像, 图像沿着高对比边缘附近出现了螺旋状图案, 并且螺距越大, 重建出来的图像质量越差, 风车叶片的数量也越来越多; 第二列是螺旋 FDK 算法得到的重

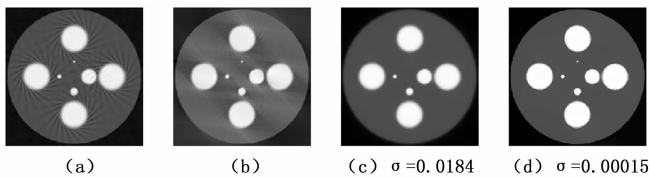


图 3 同种材料 107 层切片螺距为 1 的重建图像与校正图像

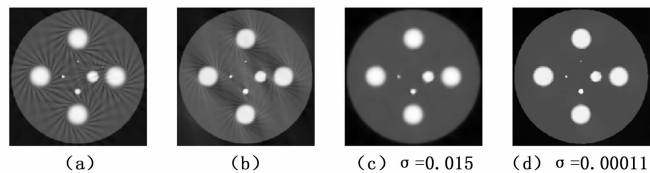


图 4 同种材料 105 层切片螺距为 1 的重建图像与校正图像

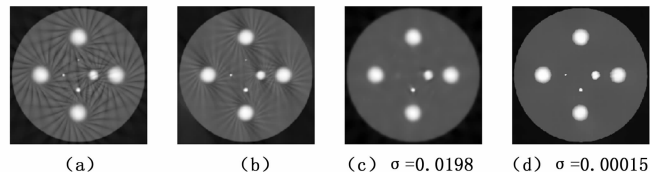


图 5 同种材料 104 层切片螺距为 1 的重建图像与校正图像

建图像，图像中存在风车伪影和锥束伪影，并且随着螺距的增大，植入物之间的黑白带状伪影也变得更为明显；第三列是原始双域滤波对第一列重建图像去噪后的图像，锥束伪影和风车伪影基本去除，但结构的边缘变得模糊，较小的植入物也消失不见；第四列是采用本文算法处理后的校正图像，去除了图像中的锥束伪影和风车伪影，保留了更多的细节特征，并且结构边缘也更加清晰。

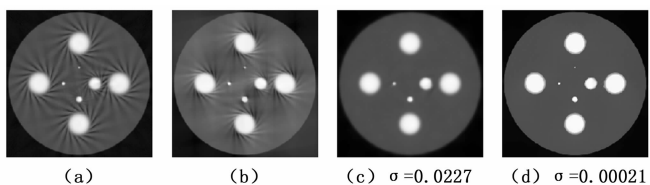


图 6 同种材料螺距为 0.75 的重建图像与校正图像

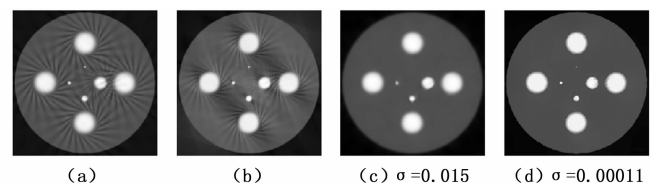


图 7 同种材料螺距为 1 的重建图像与校正图像

图 9 为不同材料植入物不同螺距下第 105 层的螺旋 CT 重建图像与校正图像，植入物的参数如图 2 和表 1 所示，其第一、二和三行分别是螺距为 0.75、1 和 1.25 的重建图像。由图 9 第一列可以看出，由于植入物的灰度值不同，风车伪影的严重程度也不相同，并且植入物与背景材料的灰度值差距越大，风车伪影也越严重。本文算法采用的  $\sigma$  值远远小于原始双域滤波的  $\sigma$  值，因此可以在去除了绝大部分的锥

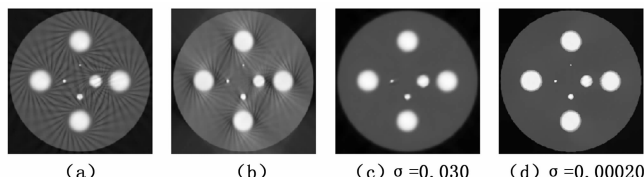


图 8 同种材料螺距为 1.25 的重建图像与校正图像

束伪影和风车伪影的同时一定程度上保留图像的边缘信息，由此可看出本文算法在整体图像质量与细节特征的恢复上有着明显的优势。

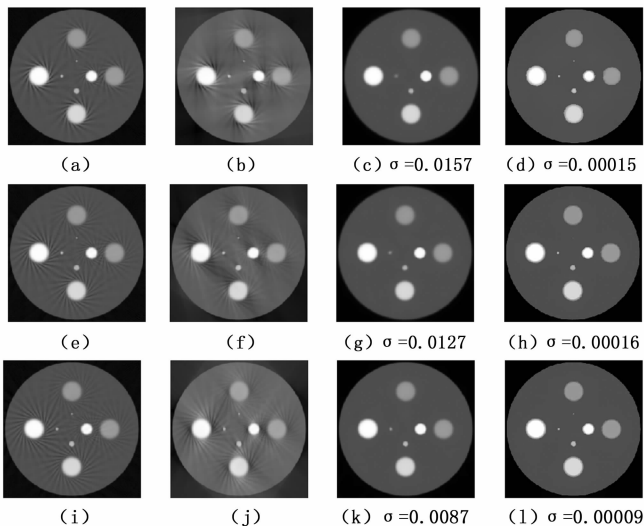


图 9 不同材料不同螺距下的重建图像与校正图像

由上述实验结果可以看出，重建平面如果离中心平面越远，即锥角越来越大时，重建出来的图像质量就越差，锥束伪影也就越严重，而 3D 加权螺旋 FDK 算法能够有效减少锥束伪影，通过调节参数  $k$  的值来调整 3D 加权函数的权重，并且随着锥角的增大，参数  $k$  的值也随之增大。对于风车伪影，由图 3、4、5 可以看出，随着锥角的增大，风车伪影越来越严重，重建图像的质量变差；由图 6、7、8 可以看出，随着螺距的增大，风车伪影叶片的数量越来越多。原始双域滤波算法可以有效去除风车伪影，但当风车伪影过于严重，双域滤波的强度过大时，双边滤波中核函数的欧氏距离较大便可能会导致相似度低的邻域被赋予较大的权值，最终造成边缘模糊和细节丢失等问题，改进后的双滤波算法用汉明距离来度量邻域间的相似性，可以选取更小的  $\sigma$  值，有效避免原始双域滤波的局限性，可以在抑制风车伪影同时保留细节信息。

### 3 结束语

本文提出了一种基于三维加权和改进的双域滤波的螺旋 CT 伪影校正算法，提高了螺旋 CT 重建图像中伪影校正的能力。首先使用 3D 加权螺旋 FDK 算法去除锥束伪影，再使用改进的双域滤波算法对图像中的风车伪影进行校正。3D 加权螺旋 FDK 算法可以抑制锥角和螺距增大对重建结

果的影响, 以此来去除锥束伪影, 而双域滤波将空域和变换域结合起来, 与单独使用双边滤波或者 STFT 小波收缩相比效果要更好, 可以在很大程度上去除风车伪影。实验结果表明, 本文算法有效去除了螺旋 CT 重建图像中大部分的伪影, 并且可以保留更多的细节特征和边缘信息。

#### 参考文献:

- [1] GREFFIER J, FRANDON J, LARBI A, et al. CT iterative reconstruction algorithms: a task-based image quality assessment [J]. *European Radiology*, 2020, 30 (1): 487-500.
- [2] ZHANG T, XING Y X, ZHANG L, et al. Stationary computed tomography with source and detector in linear symmetric geometry: Direct filtered backprojection reconstruction [J]. *Medical Physics*, 2020, 47 (5): 2222-2236.
- [3] 席志红, 曾继琴, 李爽. 基于双字典和稀疏表示的医学图像超分辨率重建 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (3): 197-200.
- [4] JANG S, KIM S, KIM M, et al. Head Motion Correction Based on Filtered Backprojection in Helical CT Scanning [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2020, 39 (5): 1636-1645.
- [5] SILVER M, TAGUCHI K, HEIN I. Windmill artifact in multislice helical CT [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5032: 1918-1927.
- [6] FELDKAMP I A, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone-beam algorithm [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1984, 1 (6): 612-619.
- [7] TANG X Y, HSIEH J, NILSEN R A, et al. A three-dimensional-weighted cone beam filtered backprojection (CB-FBP) algorithm for image reconstruction in volumetric CT-Helical scanning [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51 (4): 855-874.
- [8] BALOGH Z A, HUSZAR T, KIS B J. Iterative ring artifact removal method for helical computed tomography scans [J]. *Journal of computer assisted tomography*. 2020, 44 (5): 796-805.
- [9] HAN C, BAEK J. Dual-energy approach to reduce cone-beam artefacts in a circular orbit cone-beam CT system [J]. *Electronics Letters*, 2020, 56 (13): 648-650.
- [10] KONG H H, LIU R, PAN J X, et al. Evaluation of an analytic reconstruction method as a platform for spectral cone-beam CT [J]. *IEEE Access Practical Innovations Open Solutions*, 2018, 6: 21314-21323.
- [11] MAGKOS S, KUPSCH A, BRUNO G. Suppression of Cone-Beam Artefacts with Direct Iterative Reconstruction Computed Tomography Trajectories (DIRECTT) [J]. *Journal of Imaging*, 2021, 7 (8): 147-147.
- [12] 李嫣嫣, 李律, 李雪松, 等. 基于同伦  $l_0$  范数最小化重建的三维动态磁共振成像 [J]. *波谱学杂志*, 2022, 39 (1): 20-32.
- [13] KACHELRIESS M, KNAUP M, PENNSEL C, et al. Flying focal spot (FFS) in cone-beam CT [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53 (3): 1238-1247.
- [14] BROWN K M, ZABIC S. Method for reducing windmill artifacts in multislice CT images [C] // *Progress in Biomedical Optics and Imaging-Proceedings of SPIE*, 2011.
- [15] SHI Y Y, ZHANG Y B, CHEN X G, et al. Windmill artifact reduction based on the combined reconstructed image [C] // *Progress in Biomedical Optics and Imaging-Proceedings of SPIE*, 2018.
- [16] 黄铜港, 李保磊, 汤少杰, 等. 基于双域滤波与距离变换的螺旋 CT 图像风车伪影校正 [J]. *中国体视学与图像分析*, 2021, 26 (2): 123-133.
- [17] KNAUS C, ZWICKER M. Dual-domain image denoising [C] // *IEEE International Conference on Image Processing*, 2013, 440-444.
- [18] 徐丹萍, 王海梅. 基于双边滤波和 NSST 的红外与可见光图像融合 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (4): 201-204.
- [19] 艾玲梅, 任阳红. 基于双域滤波与引导滤波的快速医学 MR 图像去噪 [J]. *光电子·激光*, 2018, 29 (7): 787-796.
- [20] DU D Z, HWANG F K. Pooling designs and nonadaptive group testing [M]. Singapore, World Scientific, 2006.
- [11] 张凤静, 汪磊. 基于 Oracle 数据库的车型数据管理系统设计与实现 [J]. *电子技术与软件工程*, 2018 (17): 199-234.
- [12] 邱鹏, 尹泉, 张亦琼, 等. 基于 B/S 架构的电力信息监控系统设计 [J]. *工业控制计算机*, 2020, 33 (12): 125-126, 129.
- [13] 肖东裕, 胡立坤, 吕智林, 等. 基于 B/S 结构的分布式风电监控系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24 (1): 105-107.
- [14] 戴朝晖, 吴敏. 基于 MVC 模式的 Web 管理信息系统分析与设计 [J]. *中南工业大学学报 (自然科学版)*, 2003 (4): 413-415.
- [15] 孙莉, 李树刚, 陶莹, 等. 基于 B/S 模式的质量信息管理系统设计与实现 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44 (S1): 175-177, 180.
- [16] 杨茂, 孙涌, 孙兆键, 等. 风电场大规模数据管理系统设计与研发 [J]. *东北电力大学学报*, 2014, 34 (2): 27-31.
- [17] 梁鹰, 罗伟其. 基于 B/S 的异构数据库信息集成的系统设计 [J]. *计算机工程*, 2000 (12): 23-25, 41.
- [18] 宋金锁. 基于 BC/S 的教务管理系统的设计与实现 [J]. *西安邮电学院学报*, 2006 (1): 119-122.
- [19] 冯斌, 谭建军, 李绍荣, 等. 海洋地质调查数据库管理系统设计与实现 [J]. *计算机工程*, 2009, 35 (3): 29-31.
- [20] 李一曼, 周三平, 李涛. B/S 模式石化腐蚀数据管理系统趋势图设计与开发 [J]. *腐蚀与防护*, 2011, 32 (3): 232-235, 238.
- [21] 戚斌. 混合架构下 ORACLE 数据快速查找方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (8): 218-220, 225.