

文章编号 1004-924X(2011)11-2767-07

## 改进 Canny 算法的 CT 图像环形伪影校正

王 珏<sup>1,2</sup>, 黄苏红<sup>2</sup>, 蔡玉芳<sup>1\*</sup>

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;

2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:**为去除计算层析(CT)图像中的环形伪影,提高 CT 图像的定性分析能力和定量测量精度,提出了一种改进的 Canny 算法用于环形伪影校正。首先采用 S-L 滤波器对原始投影数据进行滤波,增强伪影信息。接着,设定角度阈值对梯度方向进行限制,排除斜角方向边缘的检测,实现竖直方向边缘点检测。然后,设置梯度阈值和链长度阈值实现伪影边缘点的检测与连接。最后,采用分段 B 样条拟合法对投影数据进行校正,实现多个连续的环形伪影去除。对含有环带伪影的实际 CT 图像进行了校正实验。结果表明,校正后 CT 图像环形伪影去除干净,且细节区域的标准差基本没有变化,均匀区域标准差减小,信噪比增益达 2.182 dB。该方法既可以校正多个相连的环形伪影,也可以校正单个分散的环形伪影,同时还可较好地保持图像细节和分辨率。

**关键词:**计算层析(CT)图像;环形伪影;投影正弦图;伪影校正

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2767

## Improved Canny algorithm for correcting ring artifacts of CT images

WANG Jue<sup>1,2</sup>, HUANG Su-hong<sup>2</sup>, CAI Yu-fang<sup>1\*</sup>

(1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: caiyf@cqu.edu.cn

**Abstract:** An improved Canny algorithm is proposed to remove ring artifacts in Computerized Tomography (CT) images and to improve their qualitative analysis ability and quantitative measurement precision. S-L filter is adopted to filter original projection data and enhance artifact information before using Gaussian filter. Then, the angle thresholds are set to limit gradient direction, and to exclude diagonal direction edge detection and implement vertical direction edge detection. Furthermore, a gradient threshold and an angle threshold are set to detect and connect the marginal point of artifacts. Finally, the piecewise B-spline fitting method is used to correct the projection data and eliminate multiple continuous ring artifacts. Correction experiments are carried out for the actual CT images inclu-

收稿日期:2011-05-04;修订日期:2011-07-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60972104);中央高校基本科研业务费资助(No. CDJXS11171159)

ding ring artifacts. The results demonstrate that the proposed approach can remove all of the ring artifacts of reconstructed images, keep the standard deviation in detail areas basically unchanged, reduce the standard deviation in uniform areas and increase the Signal to Noise Ratio(SNR) by 2.182 dB. The proposed method is effective in correcting not only the multiple continuous ring artifacts but also the single dispersed ring artifacts, at the same time the CT image details and resolution are reserved.

**Key words:** Computed Tomography(CT) image; ring artifact; projection sinogram; artifact correction

## 1 引言

计算层析(Computed Tomography,CT)技术作为先进的无损检测技术,不仅可以精确、清晰地显示物体内部细节的结构关系及缺陷状况,还可以定量地给出细节的密度分布及物质组成,已在医学的病情诊断和工业的缺陷识别及特征测量中得到广泛应用。三代扫描模式扫描速度快,是目前医学 CT 和工业 CT 采用的主要扫描模式,环形伪影作为三代扫描模式的一个重要问题,不仅影响了图像的质量,还给图像噪声处理以及图像分割等后续处理造成困扰,降低了图像的识别能力和测量精度<sup>[1-2]</sup>。因此,环形伪影的去除是提高 CT 图像质量的关键一步。

对于 CT 图像的环形伪影,在无法获得实时投影的原始数据或中间处理过程的情况下,只能利用投影数据或 CT 图像进行校正,因此,CT 图像环形伪影校正主要分为投影正弦图校正法和 CT 图像校正法两大类型。CT 图像校正法<sup>[3-7]</sup>是将笛卡尔坐标下的环形伪影变换为极坐标下的直线伪影进行滤波,以达到去除环形伪影的目的,它是终端用户去除 CT 图像环形伪影的重要手段;投影正弦图校正法是依据 CT 图像的环形伪影在投影正弦图中表现为垂直方向直线的特征,从投影正弦图的角度,对投影数据进行补偿修正,实现 CT 图像环形伪影的校正,目前有频域滤波法<sup>[8-9]</sup>、Hough 变换滤波法<sup>[10]</sup>和 B 样条拟合法<sup>[11]</sup>。投影正弦图校正法作为数据采集和图像重建的中间过程,和 CT 图像校正法一样,对探测器不一致性校正后残留的环形伪影有着较好的抑制效果,但是与 CT 图像校正法相比,它避免了插值变换过程,校正后图像具有较高的分辨率和保真度,所以本文研究的是投影正弦图的 CT 图像环形伪影校正方法。

从 CT 图像的伪影形貌上,环形伪影可分为两种类型:单个分散的单环伪影和多个连续的环

带伪影。在投影正弦图校正法中,频域滤波法和 Hough 变换滤波法都对单个独立分散或少数几个相连的环形伪影校正有效,而 B 样条拟合法虽然能校正多个连续的环形伪影,但是只对微弱的环带伪影有效,校正程度有限,且与频域滤波法相似,容易给图像带来新的环形伪影。作者已在文献[1]中对探测器不一致性和不稳定性导致的环形伪影校正方法进行了研究,有效地去除了 CT 图像中单个分散的环形伪影,且很好地保持了图像边缘及分辨率,但是对于多个连续的环带伪影校正具有一定的局限性。为了克服这一局限性,本文对 CT 图像中多个连续的环带伪影的校正进行研究。根据投影正弦图特性和环形伪影特征,传统的 Canny 算法能检测出大量正弦图强边缘,而环状伪影在投影正弦图所呈现的条状伪影弱边缘很容易被抑制。为了克服这一问题,本文对 Canny 算法进行改进,实现投影正弦图中环形伪影检测与识别,然后采用分段 B 样条拟合校正法对伪影处的异常投影数据进行校正。实验结果表明,该方法既可以校正多个相连的环形伪影,又可以校正单个分散的环形伪影,同时还具有较好的图像细节和分辨率保持能力。

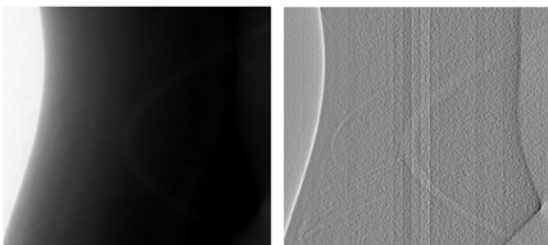
## 2 改进 Canny 算法的条状伪影特征识别

实际应用中,Canny 算法与 Roberts、Sobel、Laplace 等边缘检测算法相比,更能准确地检测图像边缘轮廓,且保证了边缘的单像素宽度,所以本文采用 Canny 算法对投影正弦图中垂直方向条状伪影进行检测。通常,在投影正弦图中被测工件细节所对应的正弦线表现为强边缘,而条状伪影边界则表现为弱边缘,同时传统的 Canny 算法仅能检测出大量的弦线边缘,从而加大了伪影弱边缘检测的难度。因此,本文对 Canny 算法中的图像预处理、非极大值抑制和边缘检测与连接过程进行了改进,提高了其垂直方向弱边缘的检测能力和针对性。

### 2.1 图像预处理

CT 系统扫描成像时,数据采集系统 A/D 转换器件输出位数不够或采集的数据中噪声过大,都会导致投影数据的动态范围变小,从而使得投影正弦图的对比度低,条状伪影特征表现不明显。所以首先采用图像增强处理方法提高投影正弦图对比度,以增强伪影的边缘。图像处理中大多数图像增强方法是针对图像局部或整体轮廓信息的增强,对垂直方向上伪影边缘增强能力较差。根据 CT 图像卷积反投影重建原理以及其重建滤波器的优点,与文献[1]相同,采用重建滤波器来增强正弦图中的垂直方向上的伪影信息。常见的重建滤波器有 R-L<sup>[12]</sup>滤波器和 S-L<sup>[12]</sup>滤波器,其中 S-L 滤波器震荡效应更小,所以采用 S-L 重建滤波器对投影数据进行高通滤波,并以滤波后的投影正弦图作为改进的 Canny 算法检测的输入图像。

图 1 为某工件投影正弦图采用 S-L 卷积滤波前后的对比图(局部图像),可以看出,滤波前正弦图图像图 1(a)对比度低,根本无法看出伪影信息。而滤波后的图 1(b)图中不仅工件对应的弦线更清晰,而且伪影信息也得到增强,以或亮或暗的竖条形式明显的表现在正弦图上。



(a)原投影正弦图 (b)滤波后投影正弦图  
(a) Original sinogram (b) Filtered sinogram of (a)  
图 1 某工件 S-L 滤波前后投影正弦图

Fig. 1 Sinograms of one object before and after S-L filtering

### 2.2 非极大值抑制

传统的 Canny 算法采用一阶偏导的有限差分来计算预处理后图像的梯度方向角,其公式为:

$$\theta(i, j) = \arctan \left[ \frac{G_y(i, j)}{G_x(i, j)} \right]. \quad (1)$$

如图 2 所示,传统的 Canny 算法是将像素梯度方向角的变化范围确定为 4 个方向,分别是 0°, 45°, 90°和 135°,在同一方向上将像素点的梯度幅值与其相邻像素的梯度幅值进行比较,若该像素

是非局部极大值,就将其设为 0,即判定为非边缘像素点。

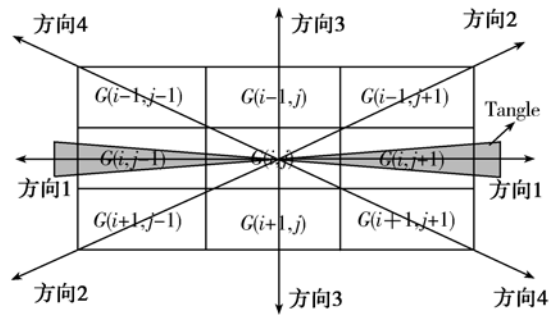


图 2 梯度方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gradient direction

由于重建图像的环形伪影在投影正弦图中表现为垂直方向的条状伪影,根据 Canny 算子像素梯度的计算方法,伪影边界点  $(i, j)$  处  $G_j(i, j) \ll G_i(i, j)$ ,那么对应的梯度方向角应为一个角度值。所以,为了实现投影正弦图中垂直方向伪影边缘的检测,在对梯度方向幅值进行非极大值抑制之前,首先对梯度方向角进行非极大值抑制,以排除工件弦线边缘的检测。设定一个角度阈值  $T_{angle}$ ,如果梯度方向角  $\theta(i, j)$  的绝对值是大于  $T_{angle}$ ,设为 0,判定为非伪影边缘像素点。

### 2.3 边缘检测与连接

CT 系统在扫描成像时,受光子波动的影响,采集的投影数据不可避免地会引入随机噪声。通常光子波动引起的随机噪声表现为孤立的噪声点,被测工件细节轮廓的正弦线表现为强边缘,条状伪影边界表现为弱边缘。条状伪影的弱边缘点与正弦图中的随机噪声类似,只是在同一列方向上检测的边缘点更为密集。如果采用传统 Canny 算法的双阈值对边缘点进行检测和链接,很难选取合适的阈值实现条状伪影的检测。阈值太小,候选边缘点检测过多;阈值太大,伪影边缘点检测不够。所以首先设置一个幅值阈值确定候选边缘像素点,然后选用链长度阈值对边缘点进行删除和连接,有效地抑制了随机噪声边缘点的影响。它的具体实现过程可表述为:

(1)设置梯度阈值  $T$ ,如果像素点的梯度幅值  $M(i, j) \geq T$ ,直接把此像素点标记为候选边缘像素点;

(2)去除候选边缘像素点中工件外轮廓正弦线的强边缘像素点;

(3) 设定链长度阈值  $T_0$ , 对每列的边缘像素点连通个数的局部极大值与  $T_0$  进行比较, 若小于  $T_0$ , 则认为该列的候选边缘像素点为孤立的噪声点, 设为 0, 判定为非伪影边缘; 若大于或等于  $T_0$ , 则保留;

(4) 按照高频采样的插值次数<sup>[13]</sup>合并、细化边缘像素点, 避免伪影边界附近的噪声线条的干扰;

(5) 对每列中边缘像素点之间连续间断个数与  $T_0$  进行比较, 若小于  $T_0$ , 则连通; 若大于  $T_0$ , 则不作处理;

(6) 设定链长度阈值  $T_1$ , 重复一次步骤(3)和步骤(5), 获得条状伪影边缘检测图像。

实际应用中, 通常  $T_1$  设置为  $3T_0$ , 所以, 它与传统 Canny 算子相似, 也是采用了双阈值的处理方法。但是, 这种双阈值的方法与传统 Canny 算法相比, 对于弱边缘检测更具有优势, 而且它既可以检测出伪影边界的弱边缘, 还可以避免随机噪声的影响。

### 3 环带伪影投影数据校正

对于单个分散的环形伪影, 一般情况下, 对每行采用常见的插值方法<sup>[1]</sup>, 即可校正环形伪影。但是, 对于连续多个探测器异常的环形伪影, 插值法可能导致校正后的投影正弦图出现严重的马赛克现象, 导致重建图像细节损失。所以通过拟合投影数据的列均值曲线的趋势曲线, 作为真实的列均值分布曲线, 以原列均值与真实的列均值的比值为校正因子, 实现伪影处投影数据的修正。实际应用中, 为了避免多项式回归拟合曲线易震荡的现象, 考虑采用 B 样条拟合对伪影位置周围的列均值投影数据进行局部拟合均值曲线的趋势曲线。而且射线通过的路径不同, 造成伪影的严重程度也不同, 投影正弦图中条状伪影是不均匀的, 如果采用同一校正因子对同一探测器在不同时间下采集的投影数据进行校正, 必然导致伪影校正不彻底或过度的情况。所以, 按照实际的探测器位置沿着列方向将每一条伪影分成均匀的 K 段, 将每一段看成均匀的伪影, 拟合列均值曲线进行校正。

假设投影数据的大小为  $M \times N$ , 其中  $M$  为总的投影视角个数,  $N$  为每个投影视角探测器个

数, 则分段校正具体实现步骤如下:

(1) 根据伪影识别的结果图像, 沿着列方向将投影正弦图中每一环带伪影按每段  $m$  行 (即每段包含  $m$  个视角的投影), 分成均匀的  $K$  段来实现校正。通过分段将每一段看作均匀伪影, 即视其伪影的严重程度相同。假设, 需对第  $k$  段第  $j$  列的伪影数据进行校正, 那么该段的列均值为

$$P_{\text{mean}}(k, j) = \frac{1}{m} \sum_{i=n \cdot (k-1)+1}^{m \cdot k} P(i, j), \quad (2)$$

$$(k=1, 2, \dots, K, j=1, 2, \dots, N)$$

式中,  $P_{\text{mean}}(i, j)$  为第  $i$  行第  $j$  列处待校正的投影数据,  $P_{\text{mean}}(k, j)$  为第  $j$  列第  $K$  段的列均值数据。如果图像中同一探测的环带伪影越均匀, 则  $m$  越大, 且越接近  $M$  值。

(2) 排除伪影位置的列均值数据, 对剩余列均值数据  $P_{\text{mean}}(k, j)$  进行 B 样条拟合, 以获得的趋势曲线数据  $P_{\text{trend}}(k, j)$  作为真实的列均值曲线数据。

(3) 根据拟合的列均值曲线投影数据与伪影处原均值的比值, 计算第  $k$  段伪影处投影数据的校正因子为

$$c(k, j) = \frac{P_{\text{trend}}(k, j)}{P_{\text{mean}}(k, j)}. \quad (3)$$

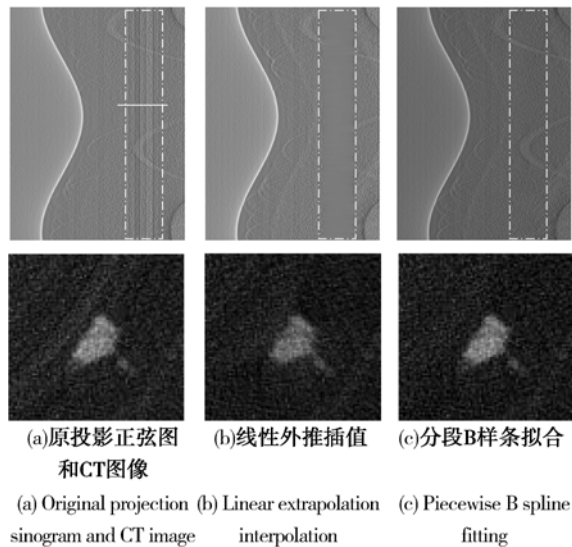


图 3 不同方法对环带伪影的校正结果图像

Fig. 3 Result images for ring artifact using different methods

(4) 所以, 计算第  $k$  段伪影的真实投影数据为

$$P'(i, j) = P(i, j) \cdot c(k, j), \quad (4)$$

$$(i = n \cdot (k-1) + 1, n \cdot (k-1) + 2, \dots, k \cdot n)$$

图 3(a) 为含有环带伪影局部 CT 图像和投影正弦

图,该区域存在 5 个相连的环带伪影,该图像扫描时高频采样插值次数为 8 次,即存在 40 个像素宽度的环形伪影。分别采用分段 B 样条拟合和文献[1]的线性外推插值校正的结果图像如图 3(b)和图 3(c)所示。每行线性外推插值校正环带伪影,投影正弦图中条带伪影处(白色虚框所示)出现了马赛克现象,弦线细节信息损失,降低了重建图像中对应的小孔位置的图像对比度;分段 B 样条拟合校正后既校正了条带伪影,且图像对比度和细节信息保持能力较好。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 伪影校正效果评价标准

实际应用中,除了定性评价外,通常采用图像的标准差和信噪比作为图像质量的定量评价指标,若图像的大小为  $M \times N$ ,则其标准差和信噪比分别为:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - \bar{\mu})^2}, \quad (5)$$

$$\text{SNR} = 20 \lg \left[ \frac{\bar{\mu}}{\hat{\sigma}} \right], \quad (6)$$

其中,  $X_{ij}$  为图像中像素点  $(i, j)$  的灰度值,  $\bar{\mu}$  为图像灰度均值:

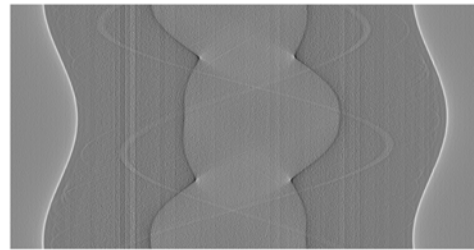
$$\bar{\mu} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij}. \quad (7)$$

通常对于细节区域,标准差既反映了图像被环形伪影污染的程度,同时也反映了图像细节信息的丰富度,所以校正前后图像在此区域的标准差应相差不大。而对于均匀区域来讲,由于基本没有任何细节纹理的变化,标准差主要反映了图像被环形伪影污染的程度,其值越小越好;而信噪比则代表图像中有用信号与伪影噪声的比值,其值越大越好。

### 4.2 伪影识别结果

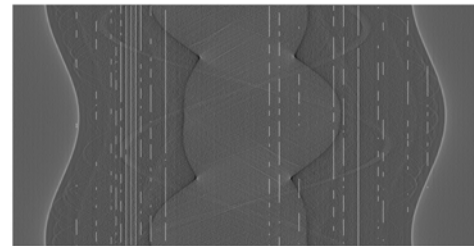
对含有环带伪影的 CT 图像的投影正弦图进行伪影识别试验,如图 4 所示的投影数据大小为  $512 \times 753$ ,高频采样插值次数为 8,图 4(a)为经 S-L 滤波增强后的投影正弦图,从图中可以发现含有较多的环形伪影,其中有单个分散的单环,也有多个相连的全环,这些伪影在投影正弦图中表现为竖直方向的弱边缘。采用基于 Canny 算子条状伪影特征识别结果图像如图 4(b)所示,图中白色竖线为所识别出伪影的位置,可以发现正弦图中伪影信息

基本都被识别,边缘定位于每个伪影右边界的像素位置,定位精确,且边缘为单像素宽度。



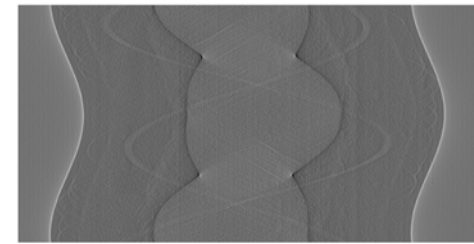
(a) 含有伪影的原投影正弦图

(a) Original sinogram contained by artifacts



(b) 伪影识别结果的投影正弦图

(b) Sinogram signed by edge with recognized artifacts



(c) 分段 B 样条拟合校正后投影正弦图

(c) Sinogram by piecewise B-spline fitting after correcting

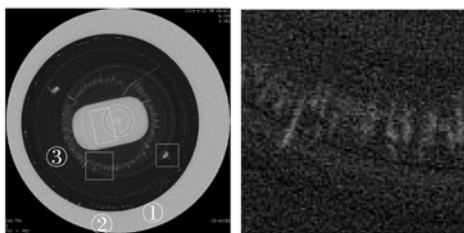
图 4 投影正弦图中伪影的识别与校正

Fig. 4 Artifacts recognition and correction in sinograms

### 4.3 伪影校正结果

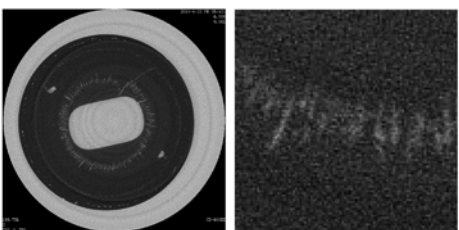
图 5(a)为原始 CT 图像( $753 \times 753$ )和②区域的局部放大图( $100 \times 100$ ),扫描该图像的高频率采样插值次数为 8 次,对应的投影正弦图如图 4(a),分别采用文献[11]B 样条曲线拟合校正法和本文方法对图 5(a)环形伪影校正试验的结果图像如图 5(b)和 5(c)所示。计算图 5(a)、5(b)、5(c)中细节区域①的标准差,以及均匀区域③的标准差和信噪比,如表 1 所示。

对比图 5(a)和图 5(c)以及校正前后对应的投影正弦图 4(a)和正弦图 4(c),证明了本文方法对环形伪影校正的有效性,且弦线细节保留较好。



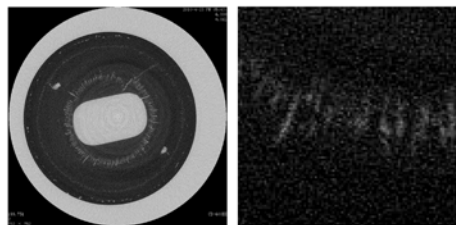
(a) 原 CT 图像和局部图②

(a) Original CT image and local image②



(b) 文献[11]B 样条曲线拟合法

(b) B-spline fitting of Ref[11]



(c) 本文方法

(c) Proposed method

图 5 实验图像

Fig. 5 Experiment images

从图 5 和表 1 可以看出,本法方法和文献[11]B 样条曲线拟合法和对 CT 图像环带伪影的校正都有一定的抑制效果,且图像细节保持能力好。但是,B 样条拟合法受到工件弦线边界的影响,给 CT 图像带来了新的环形伪影,导致均匀区域标准差变大,信噪比降低;本文方法只针对伪影处投影数据进行修正,避免了新伪影的产生,使得均匀区域标准差减小,信噪比提高。

## 参考文献:

- [1] 王珏,黄苏红,蔡玉芳.工业 CT 图像环形伪影校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1226-1233.  
WANG J, HUANG S H, CAI Y F. Ring artifacts correction for ICT images [J]. *Opt. Precision*

表 1 实验数据评价指标

Tab. 1 Experimental data of evaluation indexes

灰度图像	细节区域 标准差 $\hat{\sigma}$	均匀区域 标准差 $\hat{\sigma}$	均匀区域信噪 比 SNR(dB)
原局部图	16.417	17.663	19.691
B 样条曲线 拟合法	16.623	18.267	19.261
本文方法	16.491	16.681	21.873

## 5 结 论

针对 CT 投影正弦图的特点,本文分析和比较了工件结构细节和环形伪影的特征,根据 Canny 算法边缘检测的思想及投影正弦图中伪影弱边缘检测的局限性,提出了改进 Canny 算法的环形伪影校正方法,实现了投影正弦图中条状伪影弱边缘的检测,并采用分段 B 样条拟合法对投影数据进行校正,实现多个连续的环形伪影校正。实验结果证明,校正后 CT 图像环形伪影去除效果好,且细节区域的标准差基本没有变化,均匀区域标准差得到减小,信噪比增益达 2.182 dB,不仅可以校正多个相连的环形伪影,而且对单个分散的环形伪影校正同样有效,同时还具有较好的图像细节和分辨率保持能力。但是,对于最大连接长度小于链长度阈值的弱伪影边缘检测还存在一定的不足,而且对被测工件形状为同心圆环或圆弧的 CT 图像环形伪影校正无效,这些都是下一步的研究重点。同时从投影正弦图中来识别不一致探测器所致的环形伪影位置,它的检测效果依赖于伪影的强度,通常检测和校正了较强的环形伪影后,较弱的环形伪影又表现出来,在以后的研究中,将重点从 CT 系统的设计及物理原理上来对探测器系统所造成的环形伪影进行校正。

*Eng.*, 2010, 18(5):1226-1233. (in Chinese)

- [2] 王召巴. CT 扫描系统中成像系统响应的不一致性对重建图像质量的影响[J]. 光学技术, 2001, 27(2): 100-102.  
WANG ZH B. The effect of the imaging unit with non-uniform response on the reconstructed image in

- the CT system[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(2): 100-102. (in Chinese)
- [3] 夏雄军. 辐射图像噪声及 CT 环形伪影消除[D]. 北京:清华大学, 2007.
- XIA X J. Reduction of radiation image noise and CT ring artifacts [D]. *Beijing: Tsinghua University*, 2007. (in Chinese)
- [4] 李俊江, 胡少兴, 李保磊, 等. CT 图像环状伪影校正方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11): 1382-1398.
- LI J J, HU S X, LI B L, *et al.*. Ring artifact correction for industrial CT images [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(11):1398-1382. (in Chinese)
- [5] SIJBERS J, POSTNOV A. Reduction of ring artifacts in high resolution micro-CT reconstructions[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49(14): 1-8.
- [6] YANG J, ZHEN X, ZHOU L H, *et al.*. Geometric correction for cone-beam CT reconstruction and artifacts reduction[C]. *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Shanghai, P. R. China: IEEE*, 2008: 2386-2389.
- [7] CHEN Y W, DUAN G F. Independent component analysis based ring artifact reduction in cone-beam CT images[C]. *IEEE International Conference on Image Processing, Cairo, P. R. Egypt, IEEE*, 2009: 4189-4192.
- [8] RAVEN C. Numerical removal of ring artifacts in microtomography [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(8):2978-2980.
- [9] MUNCH B, TRTICK P, MARONE F, *et al.*. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet-Fourier filtering [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8567-8591.
- [10] 余晓镔, 罗君芳, 陈武凡. 基于弦图的 CT 图像环形伪影校正[J]. 第四军医大学学报, 2009, 30(3): 207-209.
- YU XIE, LUO J F, CHEN W F. Ring artifact correction of CT images based on sinogram[J]. *Journal of the Fourth Military Medical University*, 2009, 30(3):207-209. (in Chinese)
- [11] 李保磊, 杨民, 傅健, 等. 两种 CT 成像环状伪影校正方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7):1849-1853.
- LI B L, YANG M, FU J, *et al.*. Two ring artifact correction methods for computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1849-1853. (in Chinese)
- [12] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992:38-52.
- ZHUANG T G. *CT Theory and Arithmetic* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992:38-52. (in Chinese)
- [13] 刘妍妍, 张新, 徐正平, 等. 利用异形像元探测器提高空间分辨率[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2620-2627.
- LIU Y Y, ZHANG X, XU ZH P, *et al.*. Enhancing spatial-resolution with detectors of special-shaped pixels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2620-2627. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 珏(1961—),男,四川仁寿人,教授,博士生导师,1982年、1988年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,现为重庆大学 ICT 研究中心主任,主要从事检测技术及自动化装置、模式识别与图像处理、工业 CT 技术成像方面的研究。E-mail: wangjue@cqu.edu.cn



蔡玉芳(1974—),女,甘肃人,讲师,1998年、2002年分别于西北师范大学、重庆大学获得学士、硕士学位,主要从事模式识别与图像处理的研究工作。E-mail: caiyf@cqu.edu.cn



黄苏红(1986—),女,江西武宁人,硕士研究生,2008年于重庆大学获得学士学位,主要从事模式识别与图像处理的研究。E-mail: huangsuhong1986@163.com