

CT 探测器偏置重建中加权伪影的抑制

陈云斌^{1,2*}, 刘清华^{1,2}, 王远^{1,2}, 张成鑫^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²国家 X 射线数字化成像仪器中心, 四川 绵阳 621000

摘要 探测器偏置扫描的常用重建算法是根据投影的冗余性,对投影数据进行归一化函数加权,再采用标准滤波反投影算法重建。但是,在加权区域过窄的情况下,加权函数衰减过快,导致在重建图像的中心区域出现了圆形加权伪影。本文提出一种针对加权伪影的校正方法。首先,通过增加虚拟探测器来拓展加权区域长度;然后,对虚拟探测器缺失的投影数据进行补齐,并提出共轭插值法和正投影方法;最后,对插值后的投影数据进行探测器偏置重建。本文分别对不同长度加权区域的探测器偏置扫描投影数据进行重建,实验结果表明,当加权区域过窄时,采用本文提出的校正方法能够对加权伪影进行有效抑制。

关键词 X 射线光学; 探测器偏置扫描; 加权伪影; 虚拟探测器; 共轭; 正投影

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1234001

Suppression of Weighting Artifact in Computed Tomography Detector-Displaced Reconstruction

Chen Yunbin^{1,2*}, Liu Qinghua^{1,2}, Wang Yuan^{1,2}, Zhang Chengxin^{1,2}

¹*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;*

²*National X-Ray Digital Imaging Instrument Center, Mianyang, Sichuan 621000, China*

Abstract Based on the redundant property of projection data, the common reconstruction algorithm for the detector-displaced scan weighs the projection data for normalization function, and then reconstructs CT images using a standard filtered back projection method. However, in the condition of a narrow weighting region, the circular weighting artifact is generated in the center area of the image because of the fast attenuation of weighting function. This study proposes a correction scheme for weighting artifacts. First, a virtual detector is used to extend the weighting region. Second, the missing projection data corresponding to the virtual detector can be interpolated by conjugate and forward projection. Finally, the interpolated projection data is reconstructed by the detector-displaced scan reconstruction algorithm. The detector-displaced scan projection data with various weighting region sizes is reconstructed herein. The experimental result shows that the proposed correction method can effectively suppress the weighting artifact.

Key words X-ray optics; detector-displaced scan; weighting artifact; virtual detector; conjugate; forward projection

OCIS codes 340.7440; 100.3010

1 引 言

无论是在工业领域还是医疗领域,计算机断层成像(CT)都有扩大扫描视野的应用需求。工业 CT 的检测对象千差万别,在探测器尺寸固定的情况下,偏置扫描是扩大扫描视野的常用技术手段^[1-4]。医疗 CT,特别是近年来兴起的以口腔 CT 为代表的医疗锥束 CT,出于成本控制和多合一功能的考虑,小

尺寸平板探测器结合探测器偏置扫描方式是一种普遍采用的技术途径。

通常情况下,探测器偏置扫描获得的投影数据会存在截断且采样不均,如部分投影数据重复采样了两次,而部分投影数据则采样了一次。针对该问题常见的处理方法有重排和 Parker 类型函数加权。前者是先将扇束投影重排为平行束投影,然后通过投影数据的共轭关系,将缺失的投影数据补齐,最后

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-07-21; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 四川省重点研发项目(18ZDYF)

* E-mail: 284644485@qq.com

再采用平行束重建算法得到重建结果。该方法的不足之处在于过程较为繁琐,投影数据的重排增加了计算量,且引入插值操作,降低了空间分辨率,难以推广到锥束情况下的偏置扫描。Wang^[5]根据短扫描的思想,提出了 Parker 类型函数加权方法。选用具有特定性质的函数对重复采样的投影数据进行函数加权,其目的是将不同采样次数的投影数据对重建图像的贡献进行归一化,最后按标准扇束滤波反投影算法得到重建图像。该方法对于锥束扫描情况具有良好的移植性,且不会降低空间分辨率。

陈云斌等^[6]在探测器偏置扫描的基础上,发展了旋转中心偏置的扫描方式,且同样引入了 Parker 函数加权的处理方法。相比于探测器偏置扫描,此种方法的优点在于生成投影数据的射线张角不会扩大,且探测器响应的一致性更优。

针对探测器偏置扫描的情况,郝佳等^[7]沿用了函数加权的处理方法,并分析了加权区域长度对重建图像的影响。当加权区域过窄时,加权函数衰减过快,加权之后的投影数据不能平稳过渡到数据缺失区域,在重建图像中心区域就会引入一种新的伪影,称之为“加权伪影”。

本文针对由加权区域过窄引起的加权伪影问题,提出了一种通过虚拟探测器延拓加权区域长度

的校正方法,其中虚拟探测器缺失的投影数据可通过两种方法补齐:1)根据投影数据的共轭关系进行补齐;2)对初始重建图像进行正投影,并补齐缺失的投影数据。虚拟探测器的投影数据补齐之后,利用基于 Parker 类型函数加权的探测器偏置重建算法得到重建图像。

2 基本原理

2.1 探测器偏置扫描及其重建算法

探测器偏置扫描是一种将探测器中心偏移至一侧,以扩大扫描视野的扫描方式。如图 1 所示, C 、 D 为探测器两端点,探测器中心向右偏移的距离为 l ,焦距为 f ,扫描视野的半径为 R 。在一个圆周扫描范围内,位于 CE 内的投影数据被重复采样了两次,且 C 处的投影往往会数据截断。

Parker 类型函数加权是处理数据截断和冗余数据归一化的有效方式。记投影数据为 $p(u, \beta)$,其中 u 为任意探元坐标, C 处的探元坐标记为 $u(C)$,同理 E 处的探元坐标记为 $u(E)$, β 为旋转角度。基于 Parker 函数加权的探测器偏置扫描重建算法的步骤如下:

1) 选用 Parker 类型函数对投影数据 $p(u, \beta)$ 进行加权,得到 $p_w(u, \beta)$ 。其中加权函数的表达式为^[5]

$$\text{coeff}(u, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \sin \left\{ \pi \arctan \frac{u}{f} / \left[2 \arctan \frac{u(E)}{f} \right] \right\} + 1 \right\}, & u(C) \leq u \leq u(E) \\ 1, & u > u(E) \end{cases} \quad (1)$$

Parker 类型函数有多种表达式,只要满足容许性条件即可。

2) 对 $p_w(u, \beta)$ 进行标准滤波反投影重建,得到重建图像。

2.2 探测器偏置重建的伪影问题

基于 Parker 类型函数加权的探测器偏置重建算法的关键之处在于对投影数据的冗余区域进行加权处理,如图 1 中的 CE 区域。当该区域较窄时,加权函数衰减过于剧烈,加权之后的投影数据不能够平稳过渡到 0,在重建图像中就会引入一种新的截断伪影,这种伪影位于扫描视野的中心位置,呈圆形分布。

为了能够清晰显示这种伪影的结构形态,在 X 射线成像测试平台上对一头部仿真模体进行标准扫描,并将其重建结果作为参考图像。其中成像测试

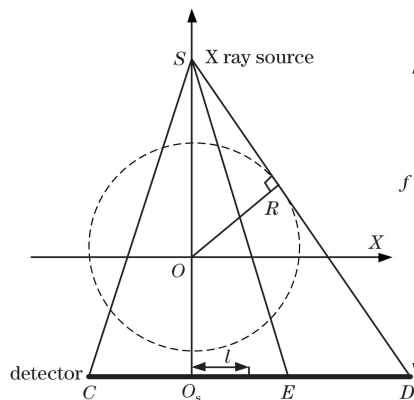


图 1 探测器偏置扫描示意图

Fig. 1 Illustration of detector-displaced scan

平台采用的是 IMD 射线源,Varian 2520v 平板探测器。实验过程中,X 射线源管电压设置为 90 kV,管电流设置为 3 mA。扫描成像参数如表 1 所示。

表 1 成像参数

Table 1 Imaging parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Projection width /pixel	924	Source to detector distance /mm	820
Projection height /pixel	748	Source to object distance /mm	550
View number	600	Image height /pixel	640
Pixel size/mm	0.254	Image width /pixel	640

首先选取锥束焦平面投影数据组成标准扇束投影,然后人为对投影数据进行不同程度的裁剪,以模拟探测器偏置扫描获得的投影数据,并采用基于 Parker 函数加权的探测器偏置重建算法获得重建图像。原始投影数据的宽度为 924 pixel,如图 2(a)所示。将投影数据进行裁剪,裁剪之后的

投影宽度分别为 724 pixel 和 524 pixel,以模拟探测器中心偏置距离分别为 100 pixel 和 200 pixel 时的投影数据,如图 2(b)、(c)所示。裁剪之后的投影数据的加权区域宽度分别为 524 pixel 和 124 pixel。为了方便描述,将 3 组投影数据分别命名为 p_1 、 p_2 和 p_3 。

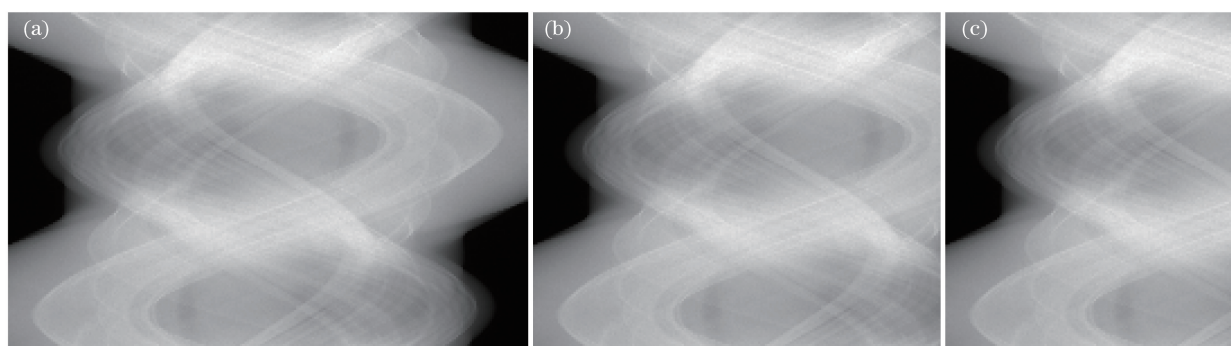


图 2 原始投影数据和裁剪之后的投影数据。(a)原始投影数据,宽度为 924 pixel;(b)裁剪后的投影数据,宽度为 724 pixel;(c)裁剪后的投影数据,宽度为 524 pixel

Fig. 2 Original projection data and truncated projection data. (a) Original projection data with 924-pixel width; (b) truncated projection with 724-pixel width; (c) truncated projection with 524-pixel width

对原始投影数据 p_1 进行标准扇束重建,得到的重建图像如图 3(a)所示。对裁剪之后的投影数据 p_2 和 p_3 进行探测器偏置重建,重建图像如图 3(b)、(c)所示。由图 3 可知,当加权区域宽度为 524 pixel 时,重建结果未出现伪影。而当加权区域宽度缩减

至 124 pixel 时,扫描视野中心区域出现了圆形加权伪影,如图 3(c)中的箭头所示位置。

为了便于对伪影及伪影校正效果进行量化分析,沿图 3(a)所标记的线条标识方向绘制灰度剖面曲线,如图 4 所示。

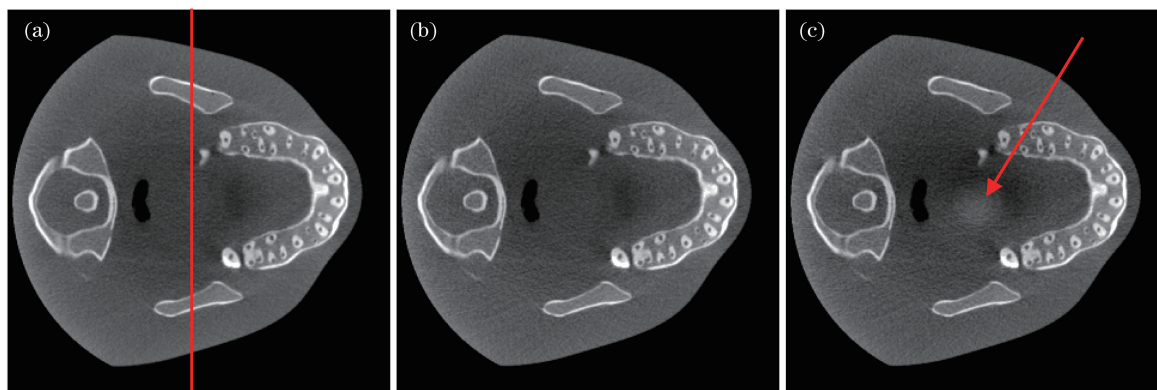


图 3 重建图像。(a)投影 p_1 的重建图像;(b)投影 p_2 的重建图像;(c)投影 p_3 的重建图像

Fig. 3 Reconstructed images. (a) Reconstructed image of projection p_1 ; (b) reconstructed image of projection p_2 ; (c) reconstructed image of projection p_3

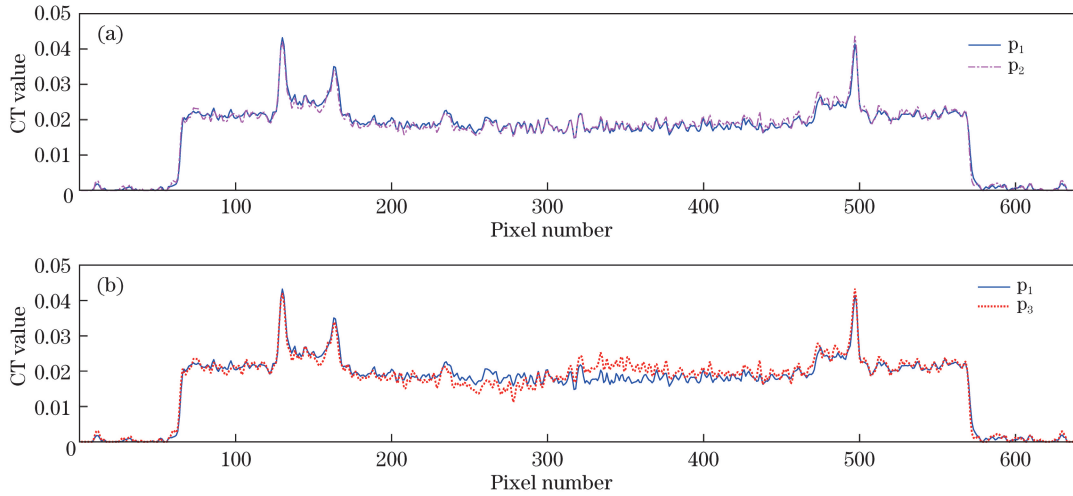


图 4 灰度剖面曲线。(a)投影数据 p_1 、 p_2 对应重建结果的灰度剖面曲线；
(b)投影数据 p_1 、 p_3 对应重建结果的灰度剖面曲线

Fig. 4 Horizontal profiles of gray value. (a) Horizontal profiles of reconstructed images corresponding to projection data p_1 and p_2 ; (b) horizontal profiles of reconstructed images corresponding to projection data p_1 and p_3

图 4(a)所示为投影数据 p_1 和 p_2 对应的重建结果的灰度剖面曲线,其中实线代表投影数据 p_1 对应的标准扇束重建结果的灰度特征,点划线代表投影数据 p_2 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征。图 4(b)所示为投影数据 p_1 和 p_3 对应的重建结果的灰度剖面曲线,其中实线代表投影数据 p_1 对应的标准扇束重建结果的灰度特征,点线代表投影数据 p_3 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征。将实线作为参考曲线,对比发现,投影数据 p_2 对应的重建结果的灰度剖面曲线与参考曲线几乎保持一致。而对于投影数据 p_3 ,在进行探测器偏置重建时,由于加权区域过窄,在靠近中心的区域出现了加权伪影,导致灰度值出现了较大的偏差。

3 伪影校正方法

由上述分析可知,采用基于 Parker 函数加权的探测器偏置重建算法获取图像时,加权区域过窄会导致加权伪影的产生。为此,本文提出一种有针对性的校正方法,通过增加虚拟探测器来拓宽加权区域,并将虚拟探测器所缺失的投影数据补齐,再进行探测器偏置重建。

如图 5 所示, CD 为真实的探测器位置,原始的投影数据冗余区域位于 CE 。增加虚拟探测器 $C'C$,其长度为 Δ ,投影数据冗余区域由 CE 延伸至 $C'E'$ 。由于虚拟探测器 $C'C$ 的投影数据缺失,因此加权伪影校正的关键在于补齐虚拟探测器缺失的投影数据。

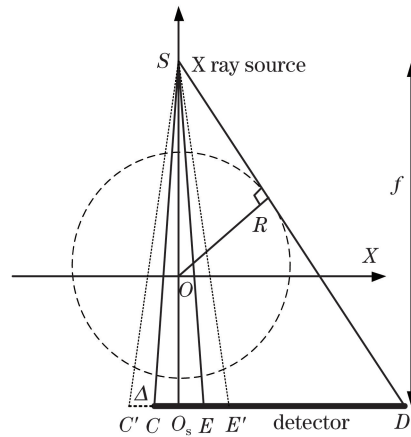


图 5 拓展投影数据的加权区域

Fig. 5 Extending weighting region of projection data

3.1 共轭插值

扇束投影经重排计算可得到平行束投影,而平行束投影存在如下的共轭采样关系^[8],即

$$p(\phi, x_r) = p(\phi + \pi, -x_r), \quad (2)$$

式中: ϕ 为平行束投影的旋转角度; x_r 为平行束投影的探元坐标。因此,虚拟探测器 $C'C$ 的投影数据可利用共轭关系进行插值求得。虚拟探测器 $C'C$ 处的投影数据为 $p(u, \beta)$, $u(C') \leq u \leq u(C)$,其对应的平行束投影可记为 $q(x_r, \phi)$,

$$\begin{cases} x_r = a \cdot \sin\left(\arctan \frac{u}{f}\right) \\ \phi = \beta + \arctan \frac{u}{f} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: a 为射线源到旋转中心的距离; f 为射线源到探测器的垂直距离。

$q(x_r, \phi)$ 的共轭采样投影为 $q(-x_r, \phi + \pi)$ 。则虚拟探测器 $C'C$ 处的投影数据为

$$p(u, \beta) = q(-x_r, \phi + \pi)。 \quad (4)$$

由于 $q(-x_r, \phi + \pi)$ 采用的是平行束坐标系, 将其转化到扇束坐标系下, 可得

$$p(u, \beta) = q(-x_r, \phi + \pi) = p\left(-u, \beta + \pi + 2\arctan \frac{u}{f}\right)。 \quad (5)$$

考虑到在进行探测器偏置重建时, 投影数据 p_3 加权区域只有 124 pixel, 会导致重建图像中加权

伪影的产生。现将探测器宽度拓宽到 200 pixel, 并采用共轭插值的方法将虚拟探测器所缺失的投影数据补齐, 再进行探测器偏置重建。拓宽后的加权区域由 124 pixel 增加到 524 pixel, 与投影数据 p_2 一致。图 6 所示分别为投影数据 p_3 在校正之前和校正之后的重建结果, 以及投影数据 p_2 的重建结果。由图 6 可知, 经过校正之后, 投影数据 p_3 中因加权区域过窄引起的加权伪影得到了较好的抑制, 重建结果与投影数据 p_2 的重建结果基本一致。

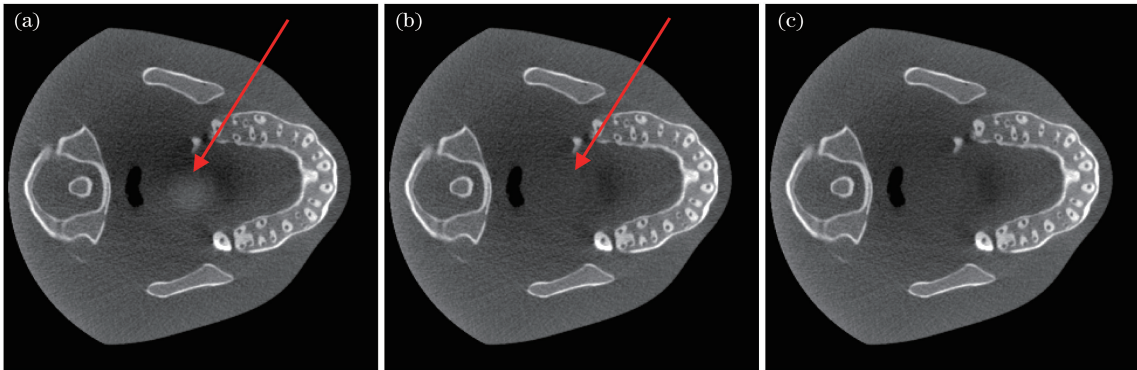


图 6 加权伪影校正前、后的重建结果。(a) 投影 p_3 伪影校正前的重建图像; (b) 投影 p_3 伪影校正后的重建图像; (c) 投影 p_2 的重建图像

Fig. 6 Reconstructed images without and with weighting artifact correction. (a) Reconstructed image of p_3 without artifact correction; (b) reconstructed image of p_3 with artifact correction; (c) reconstructed image of p_2

图 7(a) 所示为投影数据 p_2 和 p_3 在校正之前对应的重建结果的灰度剖面曲线, 其中实线代表投影数据 p_2 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征, 点划线代表投影数据 p_3 在校正之前对应的探

测器偏置重建结果的灰度特征。图 7(b) 为投影数据 p_2 和 p_3 在校正之后对应的重建结果的灰度剖面曲线, 其中实线代表投影数据 p_2 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征, 点线代表投影数据 p_3 在校

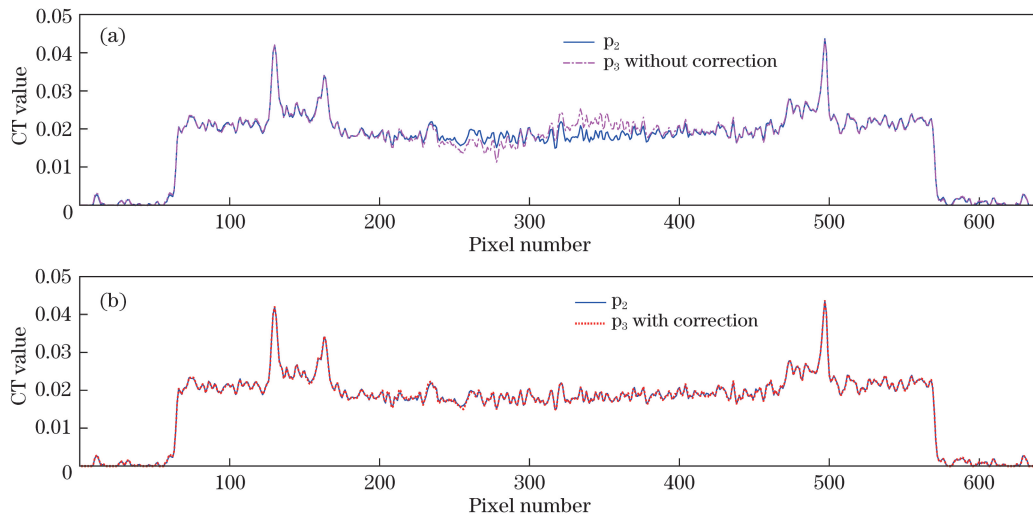


图 7 灰度剖面曲线。(a) 投影 p_2 、投影 p_3 校正之前对应重建结果的灰度剖面曲线; (b) 投影 p_2 、投影 p_3 校正之后对应重建结果的灰度剖面曲线

Fig. 7 Horizontal profiles of gray value. (a) Horizontal profiles of reconstructed images corresponding to p_2 and p_3 without correction; (b) horizontal profiles of reconstructed images corresponding to projection p_2 and p_3 with correction

正之后对应的探测器偏置重建结果的灰度特征。将实线作为参考曲线,对比发现,投影数据 p_3 经过校正之后,加权区域的宽度与投影数据 p_2 一致,在进行探测器偏置重建时,加权伪影得到了有效抑制,灰度值剖面曲线与 p_2 重建结果的灰度值剖面曲线保持良好的一致性。

3.2 正投影

基于正投影的加权伪影校正方法的实现需满足:能够获得初始重建图像;引起加权伪影的主要原因是加权区域过窄,且对虚拟探测器缺失投影数据的精度要求不高;伪影区域限制在加权区域所形成的视野范围内,图像其他区域受伪影影响较小。虚拟探测器所缺失的投影数据可通过对初始重建图像进行正投影实现补齐。结合图 5,具体步骤如下:

- 1) 对原始投影数据进行探测器偏置重建,获得初始重建图像 M_1 。
- 2) 增加虚拟探测器 $C'C$,将投影区域由 CD 延伸至 $C'D$ 。
- 3) 对重建图像 M_1 进行正投影,得到虚拟探测

器 $C'C$ 处的投影数据,采用 ray-driven 算法^[9] 完成正投影计算。

4) 对延拓之后的投影数据进行探测器偏置重建,获得经过校正之后的重建图像 M_2 。

由于重建图像 M_1 仅用于进行正投影计算,因此为了降低计算复杂度,引入多尺度思想,将 M_1 设计为低维度图像矩阵。本实验中 M_1 的维度设计为 160×160 , M_2 的维度为 640×640 。

对 M_1 进行正投影,将虚拟探测器缺失的投影数据补齐,其中虚拟探测器的长度为 200 pixel,拓宽后的加权区域由 124 pixel 增加至 524 pixel,与投影数据 p_2 一致。

投影数据 p_3 在经过延拓并将缺失的投影数据补齐之后,采用探测器偏置重建算法得到加权伪影校正之后的重建结果。图 8 所示分别为投影数据 p_3 在校正之前和校正之后的重建结果,以及投影数据 p_2 的重建结果。可以看到,投影数据 p_3 在经过校正之后,因加权区域过窄而引起的伪影得到了较好的抑制,重建结果与投影数据 p_2 的重建结果基本一致。

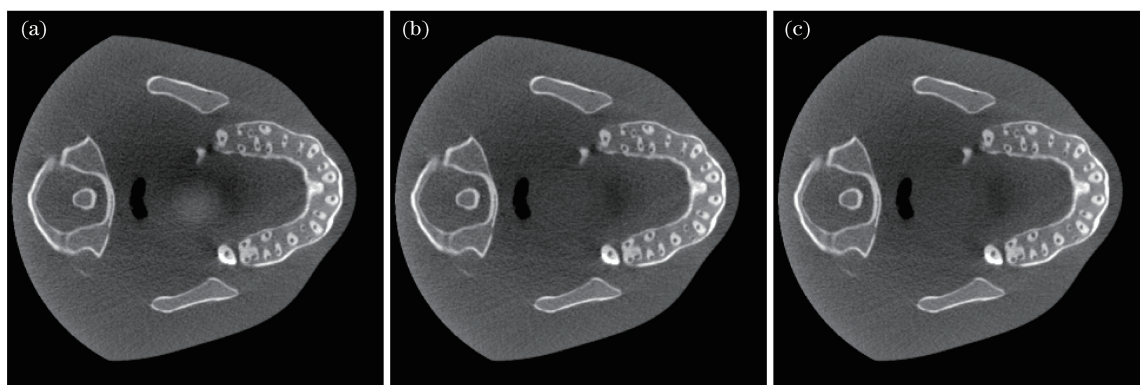


图 8 加权伪影校正前、后的重建结果。(a) 投影 p_3 伪影校正前的重建图像;
(b) 投影 p_3 伪影校正后的重建图像;(c) 投影 p_2 的重建图像

Fig. 8 Reconstructed images without and with weighting artifact correction. (a) Reconstructed image of p_3 without artifact correction; (b) reconstructed image of p_3 with artifact correction; (c) reconstructed image of p_2

图 9(a)所示为投影数据 p_2 和 p_3 在校正之前对应的重建结果的灰度剖面曲线,其中实线代表投影数据 p_2 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征,点划线代表投影数据 p_3 在校正之前对应的探测器偏置重建结果的灰度特征。图 9(b)所示为投影数据 p_2 和 p_3 在校正之后对应的重建结果的灰度剖面曲线,其中实线代表投影数据 p_2 对应的探测器偏置重建结果的灰度特征,点线代表投影数据 p_3 在校正之后对应的探测器偏置重建结果的灰度特征。将实线作为参考曲线,对比发现,投影数据 p_3 在经过校

正之后,加权区域的宽度与投影数据 p_2 一致,在进行探测器偏置重建时,加权伪影得到了有效抑制,灰度值剖面曲线与 p_2 重建结果的灰度值剖面曲线几乎保持一致。

4 结 论

本文验证了在探测器偏置重建过程中,由加权区域过窄引起的加权伪影问题,同时还提出了通过虚拟探测器延拓加权区域的伪影校正方法。针对扇束投影数据,分别采用共轭插值和正投影方法对虚

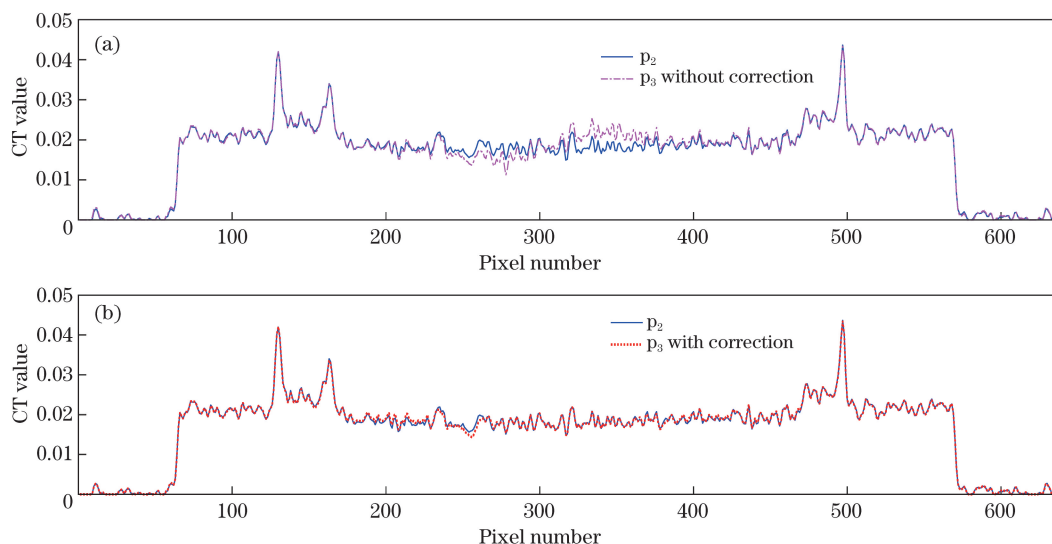


图9 灰度剖面曲线。(a)投影数据 p_2 和 p_3 校正之前对应的重建结果的灰度剖面曲线；
(b)投影数据 p_2 和 p_3 校正之后对应的重建结果的灰度剖面曲线

Fig. 9 Horizontal profiles of gray value. (a) Horizontal profiles of reconstructed images corresponding to projection data p_2 and p_3 without correction; (b) horizontal profiles of reconstructed images corresponding to projection data p_2 and p_3 with correction

拟探测器缺失的投影数据进行补齐,且加权伪影均得到了有效抑制。共轭采样插值方法利用的是投影数据的共轭关系,计算简单快速。而正投影方法需要进行二次重建,计算量大,效率低。

对于锥束扫描,焦平面投影数据等效于扇束投影数据,基于共轭插值的虚拟探测器投影数据补齐方法的精度较高。当推广至其他非焦平面层的投影数据时,投影数据不再满足严格的共轭关系,共轭插值算法精度有所降低。

正投影方法适用于扇束扫描和锥束扫描情况下的虚拟探测器投影数据补齐,其局限之处在于,如果探测器偏置只能进行局部扫描,则成像视野不能完全覆盖扫描物体,那么正投影计算的缺失投影数据就不能代表真实的投影数值,且同样存在补偿精度损失的问题。从实用性方面考虑,利用共轭插值的方法进行缺失投影数据的补齐具有更高的可行性。

参 考 文 献

[1] Liu J B, Xi X Q, Han Y, *et al.* A new scattering artifact correction method based on K-N formula for cone-beam computed tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1134001.
刘建邦, 席晓琦, 韩玉, 等. 基于 K-N 模型的锥束 CT 散射伪影校正方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1134001.

[2] Fu J, Lu H N. Bias scan mode for fan-beam X-ray ICT and its reconstruction algorithm[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(1): 115-118.
傅健, 路宏年. 扇束 X 射线 ICT 偏置扫描方式及其重构算法[J]. *光学技术*, 2003, 29(1): 115-118.

[3] Fu J, Lu H N, Gong L. Research on cone-beam ray three dimensional large field of view industrial CT imaging method[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 209-212.
傅健, 路宏年, 龚磊. 锥束射线三维大视场工业 CT 成像方法研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(2): 209-212.

[4] Wei D B, Fu J, Gong L, *et al.* Industrial CT imaging method for large objects[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(12): 1477-1480.
魏东波, 傅健, 龚磊, 等. 大尺寸构件工业 CT 成像方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(12): 1477-1480.

[5] Wang G. X-ray micro-CT with a displaced detector array[J]. *Medical Physics*, 2002, 29(7): 1634-1636.

[6] Chen Y B, Li S T, Wang Y, *et al.* An ICT reconstruction algorithm for rotation off-centered scan [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2011, 16(3): 248-253.
陈云斌, 李寿涛, 王远, 等. 转台一次偏置扫描的 ICT 重建算法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2011, 16(3): 248-253.

[7] Hao J, Li L, Zhang L, *et al.* Projection weighting reconstruction method for CBCT system with an off-

center detector[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(2): 145-149, 159.
郝佳, 李亮, 张丽, 等. 探测器偏置 CBCT 系统加权校正重建方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(2): 145-149, 159.

[8] Hsieh J. Computed tomography: principles, design,

artifacts, and recent advances[M]. 2nd ed. USA: SPIE Press, 2009: 97-101.

[9] Siddon R L. Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array[J]. Medical Physics, 1985, 12(2): 252-255.