

## 采用高频能量的 CT 几何参数自标定方法

张俊<sup>1</sup>, 闫镔<sup>1</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 闫培<sup>2</sup>, 陆利忠<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 魏星<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002;  
2. 河南省人民医院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对锥束 CT 系统中几何参数失配引起几何伪影的问题, 提出了一种采用空域高频能量的几何伪影自校正算法。该算法以重建图像的空域高频能量为目标函数建立优化模型, 通过单纯形法迭代求解使空域高频能量最大的几何参数最优解。利用投影图像的特性提取部分参数作为输入初值, 减小算法搜索范围。并采用图形处理器(Graphic Processing Unit, GPU)对自校正过程中的图像重建并行加速, 减少重建时间, 提高校正速度。实验结果表明: 该算法具有较高的求解精度, 最大相对误差不超过 5%, 对重建图像中的几何伪影有较好的校正效果。同时, 在不影响精度的情况下减少了迭代次数, 算法执行效率提高了 18.8%。

**关键词:** 锥束 CT; 几何伪影自校正; 空域高频能量判据; 图形处理器

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2540-07

## Automatic geometric calibration method based on high frequency energy for CT

Zhang Jun<sup>1</sup>, Yan Bin<sup>1</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Yan Pei<sup>2</sup>, Lu Lizhong<sup>1</sup>, Zhang Feng<sup>1</sup>, Wei Xing<sup>1</sup>

(1. Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;  
2. Hennan Province People's Hospital, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A self-calibration method based on spatial high frequency energy was proposed in view of the geometric artifacts caused by misaligned geometry in cone-beam CT. An optimization model was constructed based on spatial high frequency energy of the reconstructed image. Part of the parameters were directly extracted from the projection image to diminish the search scope, and the optimal solution of geometry parameters was achieved by NM-simplex method that makes the spatial high frequency energy of CT image maximize. To improve the speed of the algorithm, GPU was used to accelerate the process of image reconstruction to reduce the reconstruction time. Without reprocessing the reconstructed image, the proposed method has less computing complexity compared with the existing ones. The experiment results show that the presented method has significant effect in geometric artifact calibration of

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-02-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA011603)

作者简介: 张俊(1987-), 男, 硕士生, 主要从事 CT 成像技术与应用方面的研究。Email: xidianzj@gmail.com

导师简介: 闫镔(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事 CT 成像技术与应用及功能磁共振成像技术方面的研究。

Email: tom.yan@gmail.com

the reconstructed images with high accuracy and the maximum relative error is less than 5%. It can notably reduce iterations without precision reduction, and algorithm execution efficiency has been raised 18.8%.

Key words: cone-beam CT; automatic geometric calibration; spatial high frequency energy criterion; GPU

## 0 引言

锥束CT具有扫描速度快、成像分辨率高等优点,已广泛应用于医学诊断和工业无损检测等领域<sup>[1]</sup>。然而,CT系统的实际成像几何关系与理想重建数学模型之间的差异会导致重建图像中出现几何伪影,严重降低成像质量。因此,标定系统实际的成像几何参数,校正由几何参数失配引起的几何伪影,对提高CT系统成像质量具有重要的实际意义。

伴随计算机技术的进步,自校正方法得到了较大的发展,它克服了传统方法<sup>[2-5]</sup>需要定标体模的缺点,仅依靠被检测物自身的投影来进行几何参数的自标定。目前几何伪影自校正方法可以分为两类:第一类方法<sup>[6-7]</sup>根据投影图像的特性直接从投影图像中求解出系统的部分几何参数,该类方法的优点在于计算复杂度低,但至多能求解两个几何参数,且求解精度易受噪声影响。第二类方法<sup>[8-9]</sup>根据重建图像中几何伪影的特性构造一个度量几何伪影的判据,并构建系统几何参数与几何伪影相关的优化模型,通过优化算法求解优化模型得到系统的几何参数。第二类方法依据各失配几何参数对重建图像中伪影的影响构建求解模型,因而能求解系统绝大部分失配的几何参数,并具有较高的精度,实际研究中也最为广泛。

但现有方法在几何伪影判据以及初值选取方面还有一定的局限性。在几何伪影的判据方面,Kyriakou<sup>[8]</sup>借鉴Atkinson等人<sup>[10]</sup>在磁共振成像中的工作,以重建图像的熵作为几何伪影的判据,并取得了较好的效果。然而当被检测物体纹理较为丰富时,该判据的特性就不适用了。Kingston<sup>[9]</sup>提出以图像锐度作为几何伪影的判据解决了该问题,但该方法需要涉及自动阈值选取的问题,尽管采用高斯低通滤波能克服该问题,但增加了运算的复杂度;在算法初值的选取上,Kyriakou和Kingston采用预先定义的初始值作为优化算法的初值,医学CT扫描位置相对

较为固定,几何参数变化较小,该方法能在一定程度上选择较优的初值。但工业CT的扫描位置灵活多变,几何参数变化很大,采用固定的初始值并非合理的选择。

针对上述问题,文中提出一种基于空域高频能量的几何伪影自校正方法,该方法以重建图像的空域高频能量作为几何伪影的判据,构建了重建图像中空域高频能量与系统几何参数相关的优化模型,通过单纯形法求解使重建图像中空域高频能量最大的几何参数最优解。并根据圆轨迹扫描过程的特性直接从投影图像中求出部分参数作为算法输入初值,缩小了搜索空间。针对校正过程中重建速度慢的问题,采用GPU进行硬件加速,提高了校正速度。

## 1 圆轨迹几何参数自校正几何模型

工业CT采用圆轨迹扫描模式时,扫描过程中射线源和探测器固定不动,被检测物体置于载物台上,做圆周运动。建立如图1所示的坐标系来描述上述关系,以探测器的中心为原点建立右手坐标系,中间行水平向右为y轴,中间列垂直向上为x轴,探测

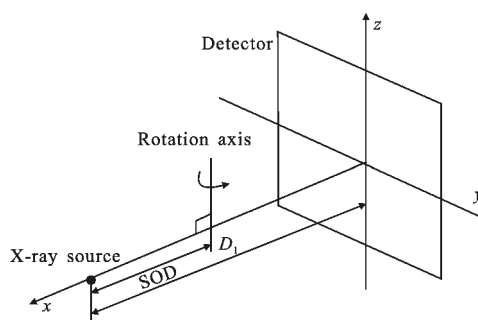


图1 单圆扫描轨迹几何模型

Fig.1 Geometrical model of circular scanning trajectory

器平面法向量方向为x轴。在理想成像条件下,重建算法要求该坐系统满足如下两个约束条件描述:(1)过光源焦点且垂直于旋转轴的直线交探测器的中心;(2)旋转轴与x轴相交且其方向向量与z轴一致。如果实际的锥束CT系统的几何关系不能满足

上述条件(即存在几何参数失配),重建图像中就会出现几何伪影。

实际 CT 系统基本都无法满足重建算法所要求的理想成像几何关系,光源、旋转轴和探测器均会存在偏离理想成像关系的情况。在图 2 所示坐标系统中,失配的几何参数总共有六个,分别是:  $D_w, D_h, D_i, D_\eta, D_\varphi, D_\theta$ 。

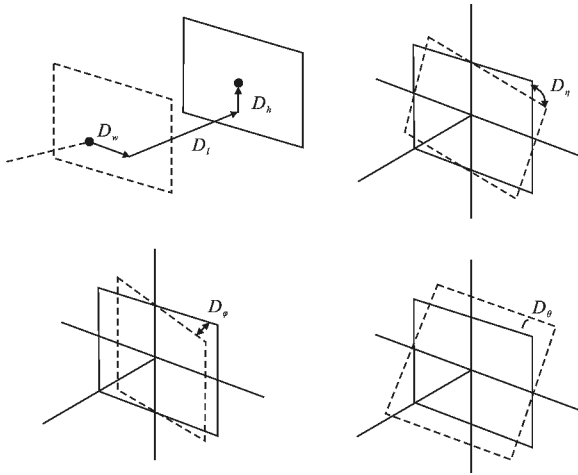


图 2 失配的几何参数

Fig.2 Misaligned geometric parameters

Smekal<sup>[2]</sup>、Yang<sup>[3]</sup>等人的研究表明,  $D_\theta$  相对其他参数对重建图像的质量影响很小,而  $D_i$  只影响重建体素的尺寸,不会通过判据体现出来。因此,文中对  $D_w, D_h, D_\eta, D_\varphi$  四个参数进行求解。

## 2 基于空域高频能量的几何伪影自校正方法

文中所提出的基于空域高频能量的几何伪影自校正方法主要分为以下 3 个步骤:(1) 算法初值选取;(2) 计算空域高频能量;(3) 参数优化。

### 2.1 初值的选取

文中采用 Patel<sup>[7]</sup>的方法来确定过光源垂直于旋转轴的直线交探测器的交点以及旋转轴在探测器平面内与 z 轴的  $\eta$  角,其思想是以相差  $180^\circ$  的两张投影图像的均方根误差最小来确定光源垂直于旋转轴交探测器的交点,其计算公式如公式(1)所示

$$RMS(d, y, \theta) = \sqrt{\frac{\sum_x (I_\theta(x+d, y) - I_{\theta+180}(-x-d, y))^2}{n}} \quad (1)$$

式中:  $RMS$  为第  $\theta^\circ$  与其相差  $180^\circ$  的投影数据中第  $y$  行剖线的均方根误差。 $n$  为两行剖线相减的个数,  $d$  为偏移量,对应  $RMS$  最小时的偏移量。对所有相差

$180^\circ$  的投影图像及其所有行重复上述过程。对每一行求出的  $d$  进行线性拟合,以该直线作为旋转轴在探测器上的投影。该直线与  $x$  轴的交点  $T_c$  即为光源垂直于旋转轴交探测器的交点,而旋转轴在探测器平面内的旋转角  $\eta$  可通过直线的斜率  $k$  求取:

$$\eta = \arctg(1/k) \quad (2)$$

采集过程中受探测器统计波动、射束硬化程度不一致等因素的影响,上述两个参数会存在一定偏差,故文中将其作为输入初值,起到减小搜索空间的目的。

### 2.2 基于空域高频能量的几何伪影判据

与失配几何参数下获得的重建图像相比,正确几何参数下获得的重建图像具有锐化的边缘,细节丰富,具有较多的高频分量。几何伪影造成的图像模糊本质上是高频分量的损失,几何伪影越严重,图像就越模糊,高频分量损失也越严重<sup>[9,11]</sup>。这也是文中采用图像清晰度作为评价准则的根源。由于几何参数失配造成了相邻像素之间的相互影响,使得图像高频分量丢失,距离中心像素越远,对中心像素影响越小。针对该特点,选取中心像素  $3 \times 3$  的邻域作为模板计算图像的空域高频能量<sup>[12]</sup>,如图 3 所示。

$p(i-1, j-1)$	$p(i-1, j)$	$p(i-1, j+1)$
$p(i, j-1)$	$p(i, j)$	$p(i, j+1)$
$p(i+1, j-1)$	$p(i+1, j)$	$p(i+1, j+1)$

图 3 计算空域高频能量判据的  $3 \times 3$  邻域

Fig.3  $3 \times 3$  neighboring region of spatial high frequency energy criterion

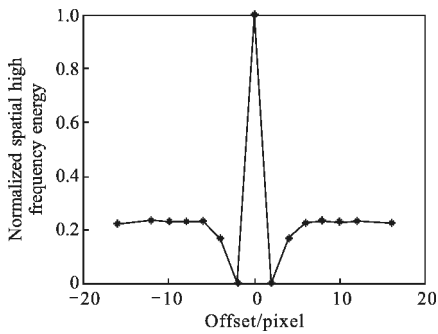
考虑到像素之间的影响是相互的,所以不需要计算所有相邻像素。又考虑到距离中心像素距离不同,各个相邻像素对中心像素的影响不同,影响大小可以通过不同的比例因子来调整。这里以距离中心像素的欧式距离作为比例因子,行或列相邻像素影响比例因子为 1,对角线相邻像素影响比例因子为  $1/\sqrt{2}$ ,定义如下空域高频能量判据:

$$C_s = \sum_i \sum_j [1/\sqrt{2} \cdot (p(i, j) - p(i-1, j-1))]^2 +$$

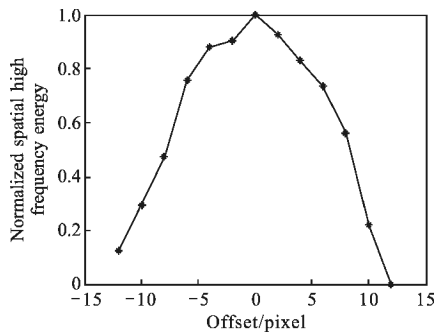
$$\frac{(p(i,j)-p(i-1,j))^2+1/\sqrt{2}\cdot(p(i,j)-p(i-1,j+1))^2+(p(i,j)-p(i,j-1))^2}{(3)}$$

由于空域高频能量将像素间的梯度值取平方, 这样已经把边缘的贡献加强, 所以也就没必要选择阈值, 克服了锐度判据涉及最佳阈值选择的问题。对偏离实际几何参数不同像素下 3D Shepp-Logan 的重建图像用上述准则进行判别, 计算其空域高频能量, 归一化后图示结果如图 4 所示。

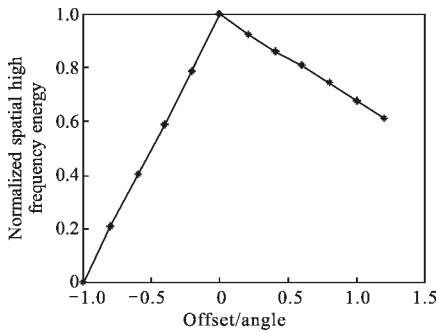
图 4 所示结果表明空域高频能量判据具有以下性质。



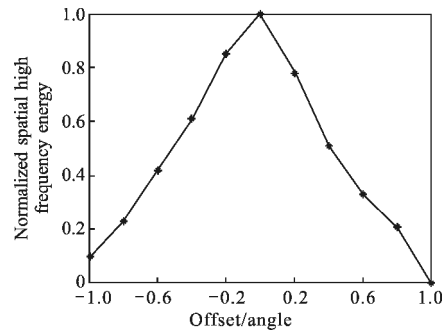
(a)  $D_w$  的偏移量与判据的曲线  
(a) Offset criterion curve of  $D_w$



(b)  $D_h$  的偏移量与判据的曲线  
(b) Offset criterion curve of  $D_h$



(c)  $D_n$  的偏移量与判据的曲线  
(c) Offset criterion curve of  $D_n$



(d)  $D_e$  的偏移量与判据的曲线  
(d) Offset criterion curve of  $D_e$

图 4 失配几何参数的偏移量与空域高频能量的关系曲线  
Fig.4 Curve of misaligned geometric parameters and spatial high frequency energy

(1) 曲线具有唯一最大值, 除  $D_w$  在最大值附近有波动外, 最大值两侧都具有单调性。

(2) 曲线最大值点对应无偏差的图像, 即可以通过寻找最大值来确定系统的几何参数。

上述性质表明空域高频能量与几何失配程度相关, 空域高频能量判据具有较好的单峰性。当重建参数与实际几何参数匹配时, 空域高频能量达到最大。因此, 可以通过寻找判据的最值找到系统的实际几何参数。

针对被检测物为匀质物体的情况, 例如匀质的铝柱, 其内部没有纹理结构, 此时需分两种情况讨论该判据的有效性。当被检测物不超出成像视野时, 被检测物的重建图像中有纹理(物体的轮廓)信息, 高频能量判据能度量重建图像中的几何伪影; 而当被检测物体超出成像视野后, 重建图像中基本没有纹理信息, 此时高频能量判据难以有效度量重建图像中的几何伪影。

### 2.3 几何参数的优化求解

通过上述分析可知, 系统几何参数标定的过程可以转化为一个四维优化问题, 求解这类问题一般采用单纯形法或鲍威尔算法等。单纯形法在优化目标函数的过程中只需要目标函数的函数值而不需要目标函数的表达式, 这也符合文中校正算法模型的特点。

参数优化过程的停止条件包含两部分: 一方面设定一个最大迭代次数  $I_{max}$ , 通常  $I_{max}=1000$ , 当迭代次数达到  $I_{max}$  时算法停止; 另一方面定义单纯形各顶点的值(空域高频能量)与单纯形中心点的值的差。

$$e_c = \sum_{i=1}^N (pv_i - cv)^2 \quad (4)$$

式中： $pv_i$  为单纯形第  $i$  个顶点的值； $cv$  为单纯形中心点的值； $N$  为顶点数，文中设定当  $e_c=0.005$  时，算法停止。

无论采取何种优化算法，每进行一次迭代都至少需要进行一次重建。而 FDK 算法中的反投影部分具有计算复杂度高，运算时间长的特点，从  $M$  幅投影重建  $N^3$  的体数据，计算复杂度为  $O(MN^3)$ ，这导致整个参数优化过程相当耗时。在文中方法中重建的目的是为了求取每次迭代后参数对应的重建图像中的空域高频能量，而实际上只需部分切片就能求得重建图像的空域高频能量，而不需要对整个体数据进行求取，并且也减少了计算量。针对该问题，文中一方面利用 GPU 对 FDK 算法进行并行加速，提高重建速度。另一方面采取只重建 2~6 层切片的策略，

而不对整个物体进行重建，以此来减少重建数据的数据规模，达到提高优化速度的目的。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 仿真实验

为了分析基于空域高频能量校正算法的有效性和几何参数的求解精度，文中用 3D Shepp-Logan 数字体模开展仿真实验。实验条件如下：探测器像素数为  $300 \times 300$ ，像素尺寸为  $0.127 \text{ mm}$ 。光源到旋转中心的距离为  $300 \text{ mm}$ ，光源到探测器中心的距离为  $900 \text{ mm}$ ， $D_w=1.397 \text{ mm}$ ， $D_h=-0.889 \text{ mm}$ ， $\eta=0.4^\circ$ ， $\varphi=-0.0809^\circ$ 。首先，在上述几何参数下使用像素数为  $300 \times 300$  的探测器对规模为  $256 \times 256 \times 256$  的 3D Shepp-Logan 数字体模进行单圆轨迹扫描，获取其投影图像。然后利用文中算法对其进行几何参数的求解，数值仿真结果如表 1 所示。

表 1 数值仿真结果

Tab.1 Results of numerical simulation

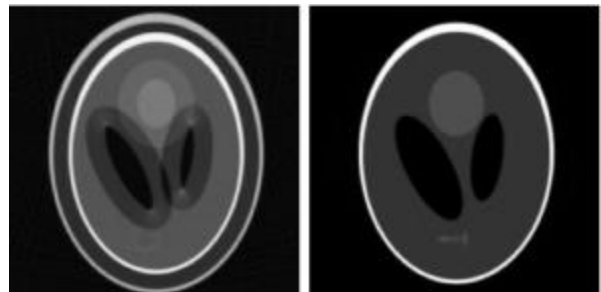
Geometry parameter	True value	Optimized value (High frequency energy)	Relative error	Optimized value (sharpness)	Relative error
$D_w$	1.397 mm	1.415 mm	1.29%	1.418 mm	1.5%
$D_h$	-0.889 mm	-0.866 mm	2.59%	-0.863 mm	2.92%
$D_\varphi$	-0.088°	-0.084°	4.5%	-0.085°	3.41%
$D_\eta$	0.4°	0.42°	5.0%	0.379°	5.25%

从表 1 结果可以看出，基于锐度判据和高频能量判据校正方法最终的优化值与真值的误差均很小，各参数求解精度各有优劣。基于高频能量判据的校正方法最终优化的参数的最大相对误差不超过 5.0%。利用其优化后的几何参数对投影图像进行校正，并对校正前后的投影图像进行三维重建，重建规模为  $256 \times 256 \times 256$ ，第 128 层切片重建结果如图 5 所示。

图 5(a) 是校正前投影图像进行三维重建的结果，重建图像中存在严重的几何伪影，图像质量较差。图 5(b) 是利用文中算法校正后的重建结果，重建图像中基本没有可见的几何伪影，图像质量整体较高。

仿真实验结果表明：基于空域高频能量的校正方法能有效求解出系统失配的几何参数，并具有较

高的求解精度，最大相对误差不超过 5%，对重建图像中的几何伪影有较好的校正效果。



(a) 未校正的重建图像 (a) Uncorrected image  
(b) 文中方法校正后重建图像 (b) Corrected image using proposed method

图 5 Shepp-Logan 体模重建图像

Fig.5 Reconstructed images of Shepp-Logan phantom

### 3.2 实际数据

为了验证该算法在实际应用中的效果,文中选用电解电容开展了如下实验,实验平台为由Thales Hawkeye130 微焦斑 X 射线源、Thales Pixium RF4343 平板探测器,探测器阵列像素数为  $2\,875 \times 2\,860$ ,像素尺寸为  $0.148\text{ mm}$ 。实验条件如下:射线源选用中焦斑模式,管电压为  $100\text{ kV}$ 、管电流为  $200\text{ }\mu\text{A}$ 。光源到旋转中心的距离大约为  $160\text{ mm}$ ,光源到探测器的距离大约为  $1\,050\text{ mm}$ 。在  $360^\circ$  范围内采集电解电容  $360$  个投影。

为了比较熵、锐度和空域高频能量这三种判据的性能,实验中分别以熵、锐度和空域高频能量作为判据对系统几何参数的优化,系统实际几何参数优化求解的结果如表 2 所示。

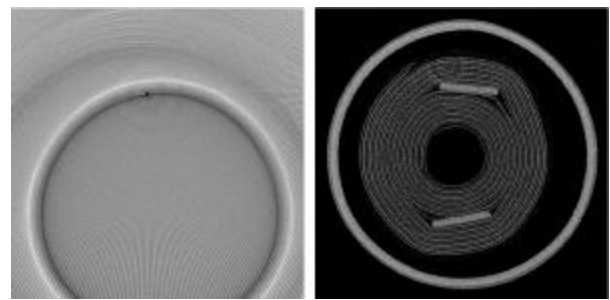
表 2 实际数据结果

Tab.2 Results of real data

Parameters	Entropy	Sharpness	High frequency energy
$D_w$	58.5223 mm	4.324 mm	4.312 mm
$D_h$	-97.68 mm	0.141 mm	0.228 mm
$D_\varphi$	-0.262°	0.0134°	0.0132°
$D_n$	0.1791°	-0.267°	-0.27°
Iterative num	43	85	69

利用优化后的几何参数对投影数据进行校正。然后,利用 FDK 算法对校正后的投影数据进行重建,重建结果如图 6 所示。

图 6(a)是以熵作为判据的结果,图 6(b)是以锐度作为判据的结果,图 6(c)是文中空域能量作为判据的结果。从对比结果可以看出,当被检测纹理相对比较复杂时,熵判据不能正确反映图像几何伪影,导致最终求解参数不准确,重建图像中仍存在几何伪影,图像质量较差。锐度和空域能量判据均能取得较好的结果,重建图像中没有明显的几何伪影,图像质量整体较高。但文中方法无需对重建图像做高斯低通滤波处理,并且空域高频能量比锐度的计算量要小。从迭代次数可以看出,基于空域高频能量的自校正算法其迭代次数要明显少于基于锐度的自校正算法,降低了 18.8%,这无疑提高了校正的速度。



(a) Kyriakou 方法校正的结果

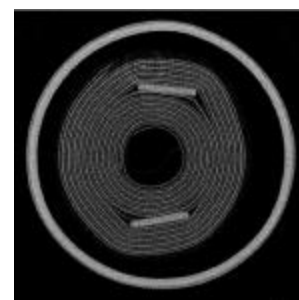
(b) Kingston 方法校正的结果

(a) Corrected image using

(b) Corrected image using

Kyriakou's method

Kingston's method



(c) 文中方法校正的结果

(c) Corrected image using proposed method

图 6 电解电容重建结果

Fig.6 Reconstructed images of electronic capacitor

## 4 结论

文中针对锥束 CT 系统成像几何参数失配造成重建图像中存在几何伪影的问题,提出了一种基于空域高频能量的几何伪影自校正方法。该方法以重建图像的空域高频能量作为几何伪影的判据,在保证度量效果的同时无需对重建图像做预处理,具有计算复杂度低的优点。利用投影图像的特性求解出部分几何参数作为算法输入初值,有效减小了算法搜索空间。并采用 GPU 对算法进行并行加速,以及采取重建部分切片的策略,有效提高了校正的速度。该方法不需要过多的先验知识而且使用灵活方便,对几何伪影有较好的校正效果,并具有较高的校正精度和校正速度。

## 参考文献:

- [1] Liu Yuanpeng, Zhang Fengshou. Cone-beam Computed Tomography System [M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2008. (in Chinese)  
刘元朋,张丰收. 锥束计算机断层成像系统 [M]. 北京: 知

- 识产权出版社, 2008.
- [2] Smekal L, Kachelriess M, Stepina E, et al. Geometric misalignment and calibration in cone-beam tomography [J]. *Med Phys*, 2004, 31(12): 3242-3266.
- [3] Kai Yang, Alexander L, Miller F, et al. A geometric calibration method for cone beam CT systems[J]. *Med Phys*, 2006, 33(6): 1695-1706.
- [4] Normand Robert, Kristina N Watt, Wang Xinying. The geometric calibration of cone-beam systems with arbitrary geometry[J]. *Phys Med Biol*, 2009, 54(24): 7239-7261.
- [5] Ford J, Zheng D, Williamson J. Estimation of CT cone-beam geometry using a novel method insensitive to phantom fabrication inaccuracy: Implications for isocenter localization accuracy[J]. *Med Phys*, 2011, 38(6): 2829-2840.
- [6] Panetta D, Belcari N, Guerra A, et al. An optimization-based method for geometrical calibration in cone-beam CT without dedicated phantoms [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(14): 3841-3861.
- [7] Patel V, Chityala R, Hoffmann K, et al. Self-calibration of a cone-beam micro-CT system [J]. *Med Phys*, 2009, 36(1): 48-58.
- [8] Kyriakou Y, Lapp R, Hillebrand L, et al. Simultaneous misalignment correction for approximate circular cone-beam computed tomography [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 53(22): 6267-6289.
- [9] Kingston A, Sakallariou A, Sheppard A, et al. An auto-focus method for generating sharp 3d tomographic images [C]// *Developments in X-Ray Tomography VII*, 2010, 7804: 78040J.
- [10] Kinson A, Hill D, Stoyle D, et al. Automatic compensation of motion artifacts in MRI [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1999, 41(1): 163-170.
- [11] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Wang Duanfang, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. *Infrared Laser and Engineering*, 2005, 34(4): 464-468. (in Chinese)  
朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(4): 464-468.
- [12] Kang Zongming, Zhang Li, Xie Pan. Implementation of an automatic focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(4): 552-555. (in Chinese)  
康宗明, 张利, 谢攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法 [J]. *电子学报*, 2003, 31(4): 552-555.