

文章编号 1004-924X(2016)06-1520-09

改进后 Ray-Box Intersection 权系数 矩阵的 SART+TVM 重建算法

王 珏^{1,2*}, 程 燕¹, 蔡玉芳², 王慧倩²

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044;

2. 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;)

摘要: 针对均匀采样稀疏型重建问题, 研究了 Ray-Box Intersection 和传统的双线性插值两种权系数矩阵计算方法。对 Ray-Box Intersection 算法的逻辑漏洞进行了改进, 利用直线生成法并结合射线斜率和像素位置关系提出了改进算法。该算法利用代数关系求得射线穿过重建区域的起点和终点, 然后取不大于其坐标的最大整数, 最后采用直线生成法, 依据射线斜率沿 X 或 Y 方向得到该条射线在投影区域内经过的所有像素块的左下角坐标集合, 对于每个像素块, 射线与像素块交点距离即为该像素块对射线的加权值。实验结果表明, 相比 Ray-Box Intersection 权系数矩阵算法, 改进后算法速度提高了 96%, 最大峰值信噪比提高了 19%; 相比双线性插值算法, 改进后算法收敛速度更快, 在同样时间代价下最大峰值信噪比提高了 5%。改进后的 Ray-Box Intersection 算法能够获得更好的重建图像质量, 细节更清晰。

关键词: 联合代数重建; 全变差最小化; Ray-Box Intersection 算法; 双线性插值算法; 权系数矩阵

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1520

SART + TVM reconstruction algorithm based on improved Ray-Box Intersection weight coefficient matrix

WANG Jue^{1,2*}, CHENG Yan¹, CAI Yu-fang², WANG Hui-Qian²

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

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

Abstract: Based on the problem of uniform sampling and sparse reconstruction, a research on calculation method for two weight coefficient matrix, including Ray-box Intersection and traditional bilinear interpolation, was conducted. Improvement on logic flaws of Ray-Box Intersection was made, and the improved algorithm was put forward by combining line generating method with the slope of the ray and pixel location. In this algorithm, the starting point and terminal point of the ray across the reconstruction region can be obtained through algebraic relation, and then the maximum integer no greater than its coordination is used to, in accordance with the ray slope along the X direction and Y direction, work out the lower left coordination collec-

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-03-30.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ030629); 国家自然科学基金(No. 61471070)

tion of all pixel blocks passed through by the ray in the projection area using the line generating method. For each pixel block, the distance of intersection point between the ray and pixel block is their weighted value. It indicates that compared with the weight coefficient matrix algorithm of Ray-Box Intersection, speed of the improved one has increased by 96%, and the peak signal to noise ratio has increased by 19%. In comparison with the bilinear interpolation algorithm, rate of convergence of the improved one is faster, and the peak signal to noise ratio has increased by 5% under the same time period. The improved Ray-Box Intersection algorithm can achieve better reconstructed images and clearer details.

Key words: simultaneous algebraic reconstruction; minimization of total variation; Ray-Box Intersection algorithm; bilinear interpolation algorithm; weight coefficient matrix

1 引 言

X 射线计算机层析成像(Computed Tomography, CT)技术能够获得高分辨率断层图像,在工业无损检测领域发挥着不可替代的作用^[1, 2]。CT 重建算法主要包括解析重建和迭代重建。解析重建所需时间短,但对噪声敏感且要求投影数据完备;迭代重建所需时间长,但在低信噪比以及投影数据不完备的情况下,仍能重建出高质量图像。不完备投影数据重建问题是工业 CT 系统实际应用中经常遇到的一类问题,其投影数据主要有 3 种采样形式:①均匀采样稀疏型,为缩短采样时间,在 360° CT 扫描时,均匀减少采样密度,只采样有限数目的数据;②不均匀采样型,在 360° CT 扫描时,当 X 射线无法穿透高密度区域时,只采样部分非均匀数据;③有限角度型,由于扫描工件太长,无法进行完整的 360° CT 扫描,只能采样有限的角度数据。为解决上述问题,通常采用基于图像全变差最小化的迭代重建算法^[3],尤其是基于图像全变差最小化的联合代数重建算法(Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique Based Total Variation Minimization, SART+TVM),其因能够有效提高不完备投影数据的重建精度和速度而得到广泛应用^[4]。

SART+TVM 算法利用 CT 图像的梯度稀疏性,并将其应用到 SART 迭代重建算法中,在 SART 每次迭代结束后,通过沿梯度方向调整图像的全变差,以提高迭代重建的收敛速度,其能够在较短的迭代次数下获得更好的重建图像质量^[4]。影响 SART+TVM 重建图像质量的因素有很多,包括:SART 松弛因子、SART 迭代次数、权系数矩阵、TVM 调节因子、TVM 迭代次数等。经过理论分析和实践证明,权系数矩阵是决定迭

代图像质量的关键因素^[5]。目前,计算权系数矩阵大多采用双线性插值算法,该方法虽计算简单,但细节模糊。计算权系数矩阵还有一种典型算法——Ray-Box Intersection 算法。从本质上讲, Ray-Box Intersection 算法计算的权系数矩阵更精准,而双线性插值算法计算的权系数矩阵是相邻像素的平均值,因此前者细节突出,边缘清晰。

本文针对均匀采样稀疏型重建问题,研究了 Ray-Box Intersection 和传统的双线性插值等两种权系数矩阵算法,并对 Ray-Box Intersection 算法的逻辑漏洞进行了改进。最后,通过仿真和实际数据测试了 Ray-Box Intersection 算法的性能。

2 SART+TVM 相关理论

2.1 SART+TVM 理论

1984 年, Andersen 和 Kak 首次提出了 SART 重建算法^[6], SART 算法的计算公式^[7]为:

$$x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{\sum_{i \in I_\theta} \left[a_{ij} \frac{p_i - \sum_{m=1}^M a_{im} x_m}{\sum_{m=1}^M a_{im}} \right]}{\sum_{i \in I_\theta} a_{ij}}, \quad (1)$$

其中, k 为迭代次数, M 为图像像素总数, I_θ 为 θ 角度下所有射线的集合, $\lambda^{(k)}$ 为第 k 次迭代的松弛因子, a_{ij} 为第 i 条射线对第 j 个像素块的加权值。

基于压缩感知理论的 SART+TVM 重建算法^[8]的具体实现步骤为:

- ① 将待重建图像 x_j 赋初值 $x_j^{(k)} = x_j^0 = 0$;
- ② 计算该投影方向下第 i 条射线的投影值 $\tilde{p}_i = \sum_{m=1}^M a_{im} x_m$ 以及该条射线的修正值 $\Delta_i = (p_i -$

$$\tilde{p}_i) / \sum_{m=1}^M a_{im} x_m;$$

③ 进行反投影并更新图像;

④ 对于迭代图像 $x_j^{(k+1)}$, 利用梯度下降法调整图像全变差, 如公式 (2) 所示, 迭代 N 次, 使得图像全变差最小化;

$$\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = \nabla \cdot \frac{\nabla u_n}{\|\nabla u_n\|} - \alpha(u_n - x_j^{(k+1)}), \quad (2)$$

其中, $1 \leq n \leq N$, n 为 TVM 的迭代次数, α 为调节因子, u_n 为全变差最小化图像, ∇u_n 代表图像 u_n 的梯度, $\|\cdot\|$ 代表 L_1 范数算子。

⑤ 令 $x_j^{(k+1)} = u_n$, 重设初始迭代图像 $x_j^{(k)} = x_j^{(k+1)}$;

⑥ 重复步骤 ②-⑤, 直至满足收敛条件。

综上, 权系数矩阵是影响该算法的关键因素之一。下面将详细阐述双线性插值算法、Ray-Box Intersection 算法及其改进算法等 3 种权系数矩阵算法。

2.2 双线性插值法

双线性插值是图像重建中最常用的求解权系数矩阵的方法, 双线性插值的原理图如图 1 所示。

该方法利用中心点 (x, y) 周围 4 个邻点的像素值 $g_1(x_1, y_1)$ 、 $g_2(x_1, y_2)$ 、 $g_3(x_2, y_1)$ 和 $g_4(x_2, y_2)$, 分别在 x, y 方向作线性内插^[9]确定像素值 $g(x, y)$ 。首先在 X 方向上进行线性插值:

$$g_{13} \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} g_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} g_3, \quad (3)$$

$$g_{24} \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} g_2 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} g_4, \quad (4)$$

其中 g_{13} 的坐标为 (x, y_1) , g_{24} 的坐标为 (x, y_2) 。

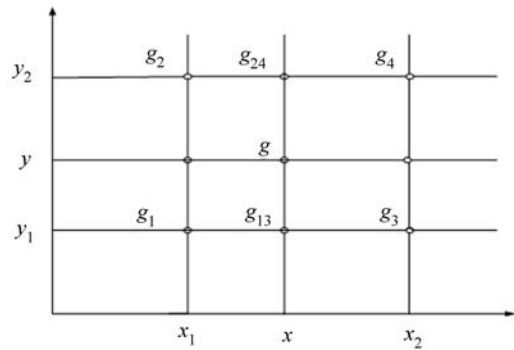


图 1 双线性插值算法

Fig. 1 Bilinear interpolation algorithm

然后在 Y 方向上插值:

$$g \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} g_{13} + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} g_{24}. \quad (5)$$

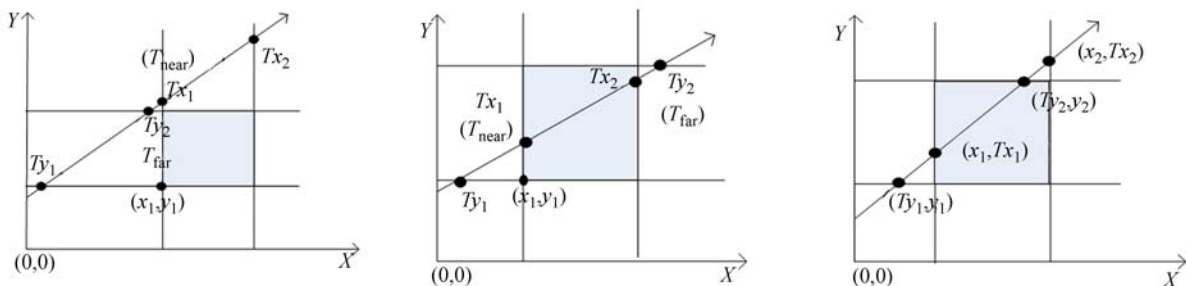
2.3 Ray-Box Intersection 算法

2002 年, Brian Smits 将三维图像中的体素点当作单位正方体“Box”, 当射线穿过“Box”时, 得到射线在“Box”内的起点和终点, 将两点间的距离作为该体素对于射线的加权值。2014 年, 杨宏成将该算法成功应用在 SART 重建算法中, 并取得了较好的效果。以二维情况为例^[10-12], 算法原理如图 2 所示。 T_{near} 和 T_{far} 分别以式 (6) 和式 (7) 来表示, 即:

$$T_{near} = \min[T_{x1}, T_{x2}], \quad (6)$$

$$T_{far} = \max[T_{y1}, T_{y2}]. \quad (7)$$

Ray-Box Intersection 算法的基本原理是将 T_{near} 和 T_{far} 的大小关系作为射线与像素块相交的依据: 若 T_{far} 大于 T_{near} , 则相交, 此时该像素块对该条射线的加权值为 $|T_{far} - T_{near}|$, 相反则不相交, 该像素块对该条射线加权值为零。



(a) 不相交情况
(a) Nonintersection

(b) 相交情况
(b) Intersection

(c) 坐标示意图
(c) Coordinate schematic

图 2 Ray-Box Intersection 算法原理图

Fig. 2 Principle diagram of Ray-Box Intersection algorithm

但经分析发现, Ray-Box Intersection 算法存在逻辑漏洞。当两相邻像素块与同一条射线的相交情况如图 3 时, 从式(8)、(9)可知, T_{far} 均大于 T_{near} , 可推出射线与两像素块均相交, 而实际上, 射线只与像素块 2 相交, 与像素块 1 不相交。

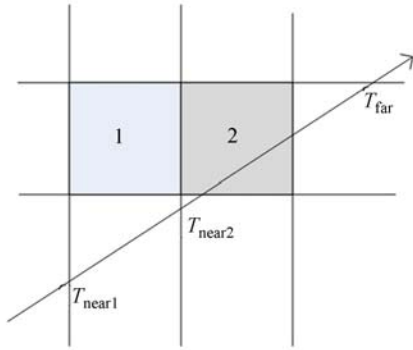


图 3 Ray-Box Intersection 逻辑漏洞展示图
Fig. 3 Logical loopholes of Ray-Box Intersection

像素块 1:
$$\begin{cases} T_{far} = T_{far} \\ T_{near} = T_{near1} \end{cases}, \quad (8)$$

像素块 2:
$$\begin{cases} T_{far} = T_{far} \\ T_{near} = T_{near2} \end{cases}. \quad (9)$$

2.4 Ray-Box Intersection 算法改进

进一步研究发现, T_{far} 和 T_{near} 的大小关系与像素块的位置和射线的斜率相关, 因此难以将算法的逻辑漏洞一一找出并改正。针对此情况, 本文提出一种改进的 Ray-Box Intersection 算法, 实现

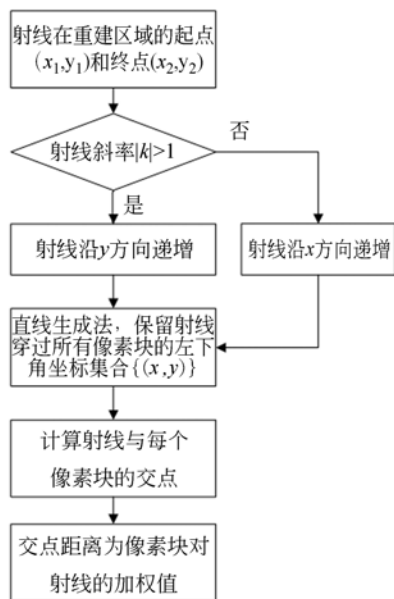


图 4 改进后算法流程图
Fig. 4 Flow chart of improved algorithm

流程如图 4 所示。当射线斜率不同时, 利用直线生成法^[13]沿不同方向生成像素块, 并结合射线斜率和像素位置关系得到射线经过的像素块, 如图 5 中阴影部分所示。

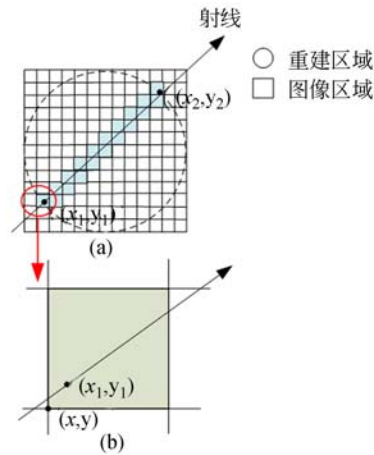


图 5 改进后算法原理图。(a) 射线与重建区域示意图, (b) 起点像素块坐标示意图

Fig. 5 Principle diagram of improved algorithm. (a) Diagram of ray and reconstruction area, (b) Coordinate diagram of starting point pixel.

改进的 Ray-Box Intersection 算法实现过程为: 首先, 利用代数关系求得射线穿过重建区域的起点和终点, 如图 5(a) 所示; 然后, 对其坐标取不大于它的最大整数, 如图 5(b) 所示; 最后, 采用直线生成法^[13], 依据射线斜率沿 X 或 Y 方向得到该条射线在投影区域内经过的所有像素块的左下角坐标集合 $\{(x, y)\}$, 对于每个像素块, 射线与像素块交点距离即为该像素块对射线的加权值。

3 实验结果及分析

为验证本文方法的可行性和有效性, 分别利用 Shepp-Logan 仿真投影数据和实际 CT 扫描数据进行实验。实验的软件平台为 MATLAB R2012b, 硬件平台为的 ThinkPad E425 笔记本电脑, 其主要配置为: AMD E2-3000M 处理器 (1.8 GHz), 6.0 GB 内存, 64 位操作系统。投影角度范围为 $0 \sim 360^\circ$, 详细实验参数见表 1。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

实验对象	图像矩阵	完整视角数	射线数	稀疏程度	稀疏扫描间隔(°)	λ	k	α	N
Shepp-Logan	256×256	256	257	1/2	2.81	0.3	6	0.3	10
测试卡	580×580	512	580	1/2	1.41	0.3	7	0.2	2
密度测试模型	569×569	512	569	1/2	1.41	0.3	7	0.2	10

本文采用两种方法定性及定量比较不同权重系数矩阵算法的重建图像质量:(1)灰度曲线对比,即绘制重建图像细节位置的灰度曲线,并与原图相应灰度曲线进行对比;(2)定量比较,即在图像上任取一平滑区域,采用均方误差(Mean Square Error, MSE)和峰值信噪比(Peak Signal-Noise Ratio, PSNR)^[14-16]评价重建结果,如式(10)和式(11)。

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [y(i, j) - x(i, j)]^2, \quad (10)$$

$$PSNR = 10 \log \frac{a_{\max}^2}{MSE}, a_{\max} = 2^l - 1, \quad (11)$$

其中 $y(i, j)$ 、 $x(i, j)$ 分别为原始图像和重建图像,图像尺寸大小为 $M \times N$, l 为每个像素的位深。

3.1 Shepp-Logan 模型实验

本部分实验参数见表 1。实验结果如图 6 (b), 6(c) 和 6(d) 所示, 在迭代次数为 6, 达到最大峰值信噪比时, 各算法所需时间见表 2。

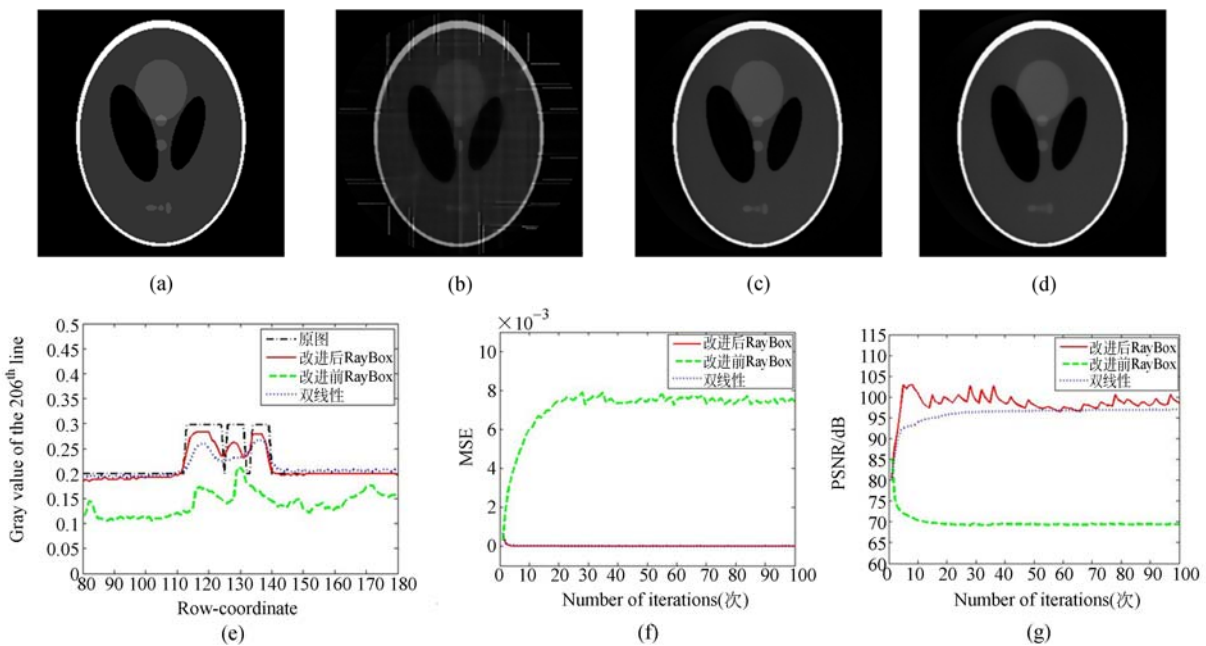


图 6 Shepp-Logan 模型实验结果及分析。(a) 原图,(b),(c),(d) 分别为基于改进前、后 Ray-Box Intersection 和双线性插值的权重系数矩阵 SART+TVM 重建结果图,(e) $x=206$ 行的灰度对比曲线,(f)和(g)分别为 2 种算法在不同迭代次数下的均方误差和峰值信噪比

Fig. 6 Experiment results and analysis of Shepp-Logan model. (a) Original image, (b), (c) and (d) SART+TVM algorithm reconstruction images based on unimproved and improved weight coefficient matrix of Ray-Box Intersection and bilinear interpolation, (e) Grayscale contrast profile of the 206th line, (f), (g) MSE and PSNR profile of two algorithms under different iterations.

表 2 实验时间

Tab. 2 Experimental times

(s)

实验条件	改进前 Ray-Box Intersection	改进后 Ray-Box Intersection	双线性插值
迭代 6 次	34 128.35	1 342.75	118.66
最大峰值信噪比	5 688.08	1 119	1 938.11

从重建图像及其灰度曲线可明显看出,相比改进前算法,改进后算法重建图像中伪影少;相比双线性插值重建图像,改进后算法重建图像细节更清晰,对比度更高,如图 6(b)~6(e)所示。此外,为进一步了解算法是否收敛以及收敛速度,根据评价指标 2,在重建图像中任取一平滑区域(本实验 $(x, y) = ([170:204], [155:183])$),计算其均方误差和峰值信噪比,结果如图 6(f)和图 6(g)所示,针对图 6(f),因改进前算法的 MSE 值较大,在同一幅图中无法明显看出其余两种算法的 MSE 值差异,但结合式(11)和图 6(g),可推导出改进后算法 MSE 值优于双线性插值算法。由图可知,3 种算法均收敛,并且在相同迭代次数下,改进后算法与另两种算法相比,具有较小的均方误差和较大的峰值信噪比。

从表 2 可知,当迭代次数为 6 时,改进后算法的重建时间是改进前算法的 1/25,是双线性插值算法的 11 倍,即相同迭代次数时,改进后算法重建所需时间少于改进前算法,但多于双线性插值算法。这是因为 Ray-Box Intersection 算法采用线驱动方式,时间复杂度为 $O(\sqrt{MN})$,在计算射线经过的像素块位置时,改进前算法需计算射线与像素块 4 条边界的 4 个交点并进行逻辑判断,故算法耗时长,而改进后算法利用直线生成法只需一次计算便可直接得到交点,因此在时间上有很大改善。达到最大 PSNR 时,改进前算法迭代 1 次达到 86 dB,改进后算法迭代 5 次达到 102 dB,双线性插值算法迭代 98 次达到 97 dB 时,所需时间依次为 5 688.08s、1 119 s 和 1 938.11 s,即改进后算法最大 PSNR 值比双线性插值算法更大,且所需时间更少。由图 6(g)可知,改进后算法的收敛速度很快,虽存在一定幅度震荡,但其 PSNR 值始终优于双线性插值。

综上所述:改进后算法相比改进前算法速度提高了 96%,最大 PSNR 值增加了 19%;与双线性插值算法相比,两种算法所需的时间基本相同,而改进后算法最大 PSNR 值增加了 5%。改进后算法重建效率高,重建图像质量好,且细节清晰。

3.2 测试卡和密度测试模型实验

为进一步检验改进后算法的可靠性,采用测试卡和密度测试模型实际 CT 扫描数据进行实验。本文所用测试卡由两个中间嵌有钢丝的矩形钢块和一个条形测试卡拼接组成,每一钢块长为

100 mm,测试卡长度为 70 mm;密度测试模型是将不同密度的圆柱置于圆形套筒内形成,实验参数见表 1。针对此实际 CT 实验数据,利用不同权系数矩阵进行 SART+TVM 图像重建。

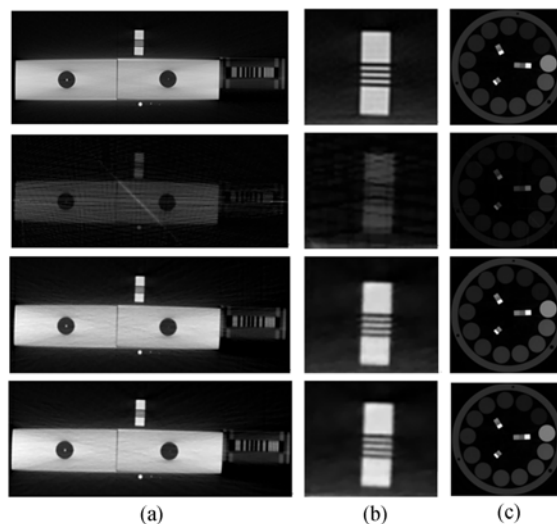


图 7 测试卡和密度测试模型重建结果。(a) 测试卡实验重建图像,(b) 图(a)对应的细节图,(c) 密度测试模型实验重建图像,重建所用的方法分别为:完备投影数据 FBP 重建(第一行)、基于改进前 Ray-Box Intersection 的 SART+TVM 重建(第二行)、基于改进后 Ray-Box Intersection 的 SART+TVM 重建(第三行)和基于双线性插值的 SART+TVM 重建(第四行)。

Fig. 7 Reconstruction results of test card and density test model. (a) Reconstruction images for test card model, (b) Magnified images for details in images (a), (c) Reconstruction images for density test model. Reconstruction methods: FBP reconstruction with complete projection data (the first line), SART&TVM reconstruction based on unimproved Ray-Box Intersection algorithm (the second line), SART&TVM reconstruction based on improved Ray-Box Intersection algorithm (the third line) and SART&TVM reconstruction based on the bilinear interpolation algorithm (the fourth line).

图 7 中第一行为完备投影数据的 FBP 重建结果图,在实验结果量化分析中作为原图,第二行、第三行和第四行分别是改进前、后的 Ray-Box Intersection 算法和双线性插值算法在稀疏 1/2

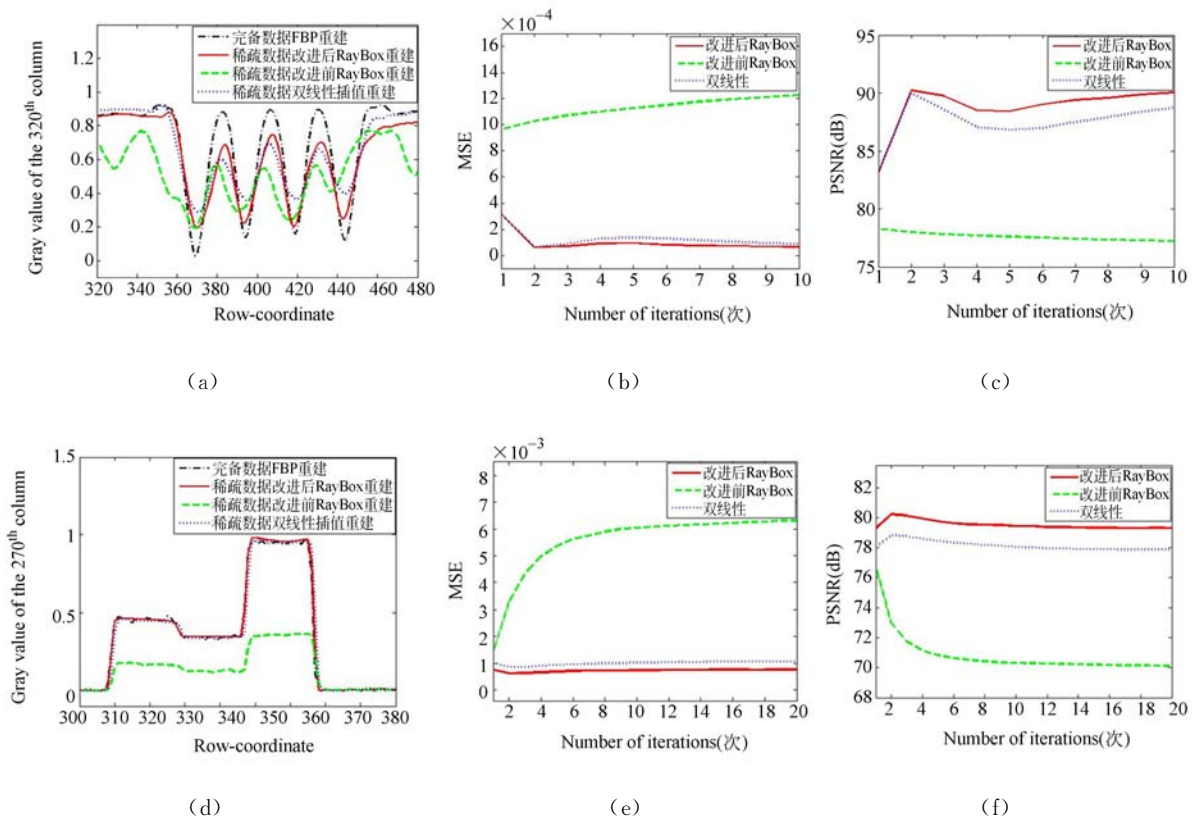


图 8 图 7 中重建图像的均方误差和峰值信噪比分析。(a)为图 7(b)在第 320 列的灰度曲线图,(b)和(c)分别为测试卡实验在不同迭代次数下的均方误差和峰值信噪比,(d)为密度测试模型在第 270 行的灰度曲线图,(e)和(f)分别为密度测试模型实验在不同迭代次数下的均方误差和峰值信噪比。

Fig. 8 MSE and PSNR analysis of reconstruction results in Fig7. (a) Grayscale profile of the 320th column in Fig 7 (b), (b) and (c) MSE and PSNR profile of test card experiments under different iterations, (d) Grayscale profile of density test model in the 270th line, (e) and (f) MSE and PSNR profile of density test model experiments under different iterations.

的实际数据下的重建结果图,对比图 7 第二行和图 7 第三行可知:算法改进后的重建图像质量较改进前的更好,伪影更少;与双线性插值算法对比,改进后方法的重建图像上一些细节部分的对比度较高,在图 8(a)所示重建图像中任取一平滑区域(测试卡 $(x, y) = ([338; 370], [199; 238])$, 密度测试模型 $(x, y) = ([260; 274], [369; 393])$),计算不同迭代次数下的均方误差和峰值信噪比,结果如图 8(b)、图 8(c)、图 8(e)和图 8(f)所示。由图可知:随着迭代次数的增加,曲线逐渐平稳,算法收敛;在相同迭代次数下,改进后算法与另两种算法相比,具有较小的均方误差和较大的峰值信噪比;在不同迭代次数下,改进后算法的峰值信噪比始终优于双线性插值算法。

从以上分析可得出:基于改进后 Ray-Box Intersection 权系数矩阵的 SART+TVM 算法的重建图像的峰值信噪比高,细节更加清晰,图像质量好。

4 结 论

针对双线性插值算法细节模糊的缺点,本文分析了 Ray-Box Intersection 算法原理,针对其逻辑漏洞进行了完善,使改进后的算法计算的权系数矩阵更精确。

实际 CT 扫描数据和仿真数据的对比实验结果表明,相比改进前算法,改进后的算法缩短了重建时间,提高了重建图像质量;相比双线性插值算

法,改进后的算法收敛速度更快,重建效率更高,能够更好地保留图像细节,重建图像更加清晰,同

时也提高了峰值信噪比。

参考文献:

- [1] 邹晓兵,曾理. 锥束螺旋 CT 半覆盖扫描重建[J]. 光学精密工程, 2010,18(2):434-442.
ZOU X B,ZENG L. Half-cover scanning and reconstructing for helical conebeam CT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(2):434-442. (in Chinese)
- [2] HUANG R Z, MA K L, McCORMICK P, et al.. Visualizing industrial CT volume data for nondestructive testing applications[J]. *IEEE Visualization 2003, Proceedings*, 2003:547-554.
- [3] 杨富强,张定华,黄魁东,等. CT 不完全投影数据重建算法综述[J]. 物理学报, 2014,63(5):58701(12).
YANG F Q,ZHANG D H,HUANG K D, et al.. Review of reconstruction algorithms with incomplete projection data of computed tomography[J]. *Physics*, 2014,63(5): 58701-58701. (in Chinese)
- [4] 李毅. 有限角度三维 CT 图像重建算法研究 [D]. 太原:中北大学学位论文,2011.
LI Y. *Three-dimensional CT image reconstruction algorithm research with limited angle* [D]. Taiyuan:Graduate University of North Central University, 2011. (in Chinese)
- [5] JIANG Y, XU F, XU B. Acoustic Emission tomography based on simultaneous algebraic reconstruction technique to visualize the damage source location in Q235B steel plate[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015,64-65:452-464.
- [6] ANDERSEN A H, KAK A C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the art algorithm[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1984,6(1):81-94.
- [7] XIANG. Iterative image reconstruction for computed tomography and its parallelization[J]. *Dissertation Abstracts International*, 2005,67(1):384-384.
- [8] SAMEI E, PAN Y, PELC N J, et al.. TV-regularized iterative image reconstruction on a mobile C-ARM CT[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2010,7622-7622.
- [9] 龚昌来,杨冬涛. 一种改进的双线性插值图像放大算法[J]. 激光与红外, 2009,39(8):899-901.
GONG CH L,YANG D T. An improved image zooming algorithm based on bilinear interpolation[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(8): 899-901. (in Chinese)
- [10] WOO A. Fast Ray-Box Intersection[J]. *Graphics Gems*, 1990:395-396.
- [11] RESHETOV A, SOUPIKOV A, HURLEY J. Multi-level ray tracing algorithm[C]. *ACM SIGGRAPH, Los Angeles*, 2005, 1176-1185.
- [12] 杨宏成. 基于压缩传感理论的锥束 CT 断层图像重建算法研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
YANG H CH. *Cone beam CT image reconstruction algorithms based on the theory of compressed sensing*[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014. (in Chinese)
- [13] 厉玉蓉,董付国,刘岩,等. 直线生成的像素行算法[J]. 中国图象图形学报, 2011,16(10):1896-1899.
LI Y R,DONG F G, LIU Y, et al.. Straight line generation algorithm based on pixel line[J]. *China Image and Graphics*, 2011,16(10):1896-1899. (in Chinese)
- [14] 刘成云,常发亮. 基于稀疏表示和 Weber 定律的运动图像盲复原[J]. 光学精密工程, 2015,23(2):600-608.
LIU CH Y,CHANG F L. Blind moving image restoration based on sparse representation and Weber's law[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(2): 600-608. (in Chinese)
- [15] HANIF A, MANSOOR AB, EJAZ T. Iterative

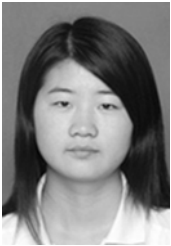
tomographic image reconstruction by compressive sampling[C]. 2010 17th IEEE International Conference on Image Processing, Hong kong: IEEE Computer Society, 2010: 4313-4316.

- [16] 王莎, 陈跃庭, 冯华君, 等. 基于 TwIST-TV 约束的图像去模糊方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 34

(6):2000-2006.

WANG SH, CHEN Y T, FENG H J, *et al.*. TwIST-TV regularization based image deblurring method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6):2000-2006. (in Chinese)

作者简介:



程 燕(1992—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,2014 年于武汉轻工大学获得学士学位,主要从事模式识别与图像处理的研究。E-mail: 1714916465@qq.com

导师简介:



王 瑛(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.

(版权所有 未经许可 不得转载)