

文章编号: 1000-8055(2007)05-0768-05

提高三维 ICT 成像空间分辨率的扫描方式 及其重建算法

魏东波, 傅 健, 李 斌, 张 磊

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 对三维工业计算机层析成像(Three Dimensional Industrial Computed Tomography, 3D-ICT)空间分辨率提高技术进行了研究, 提出了一种通过 $1/4$ 面阵探测器偏置扫描提高成像空间分辨率的锥束 3D-ICT 扫描方式, 推导了它的基于平行束重排的滤波反投影重建算法. 这种方法首先通过面阵探测器中心相对于旋转中心偏移四分之一探测单元宽度的扫描结构获取二维投影序列, 再对其进行平行束投影重排, 最后利用平行射束特点实现投影水平方向采样频率加倍, 从而提高 3D-ICT 水平方向的重建空间分辨率. 计算机仿真结果证明了该扫描方式和重建算法的正确性. 利用该方法, 可使 3D-ICT 水平方向重建空间分辨率提高近 1 倍.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 计算机层析成像; 锥束扫描; 空间分辨率; 滤波反投影重建算法

中图分类号: V231.9; TP391

文献标识码: A

Scan mode and its reconstruction algorithm for improving spatial resolution of 3D-ICT

WEI Dong bo, FU Jian, LI Bin, ZHANG Lei

(School of Mechanical Engineering and automation, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Spatial resolution improvement techniques for three dimensional industrial computed tomography (3D-ICT) have been researched in this paper. A cone-beam 3D-ICT scan mode was proposed to improve the spatial resolution by the quarter-detector offset. Its filter back-projection reconstruction algorithm based on the parallel beam rebin principle was deduced. Firstly this method acquires the two dimensional projection sequence by offsetting the detector center a quarter of the detector channel width with respect to the iso-center. Secondly it rebins these projects into parallel data. Finally it doubles the sampling frequency of parallel data with the symmetry between two projection view angles with an angle interval 180° . Computer simulation results prove the correction and the validity of this algorithm. Using this algorithm, the spatial resolution can be improved approximate 100% along the horizontal reconstruction direction.

Key words: aerospace propulsion system; computed tomography; cone-beam scan; spatial resolution; filter back-projection reconstruction algorithm

收稿日期: 2007-01-19; 修订日期: 2007-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575015, 60502020)

作者简介: 魏东波(1952), 男, 湖北赤壁人, 副教授, 主要从事现代无损检测技术研究, weidongbo@buaa.edu.cn

三维工业计算机层析成像(Three dimensional Industrial Computed Tomography, 3D-ICT)是一种先进的非接触式测试技术,可无损地全息再现被检对象内、外部结构的精细三维形态,广泛应用于航空、航天等领域产品的无损检测和无损评估,是保障导弹、火箭、飞机发动机叶片等关键零、部件可靠性的重要检测手段^[1-2]. 目前,为进一步促进 ICT 技术在航空、航天领域的应用,需要进一步提高 ICT 成像的空间分辨率.

从 ICT 的原理可见,ICT 成像的第一步是离散探测器对投影连续信号的采样. 因此,采样频率必须满足 Nyquist 采样定理,即采样频率必须至少是投影中最高频率的两倍,以避免信号频谱混叠,降低空间分辨率. 在目前最为广泛采用的基于单圆轨道锥束扫描和 FDK(Feldkamp)型重建算法的 3D-ICT 中,投影所含最高频率为有效射束宽度(与射线源焦点尺寸、几何扫描结构和探测单元宽度有关)的倒数. 通常,采样频率不能大于探测单元宽度的倒数,难以满足 Nyquist 采样定理. 为提高 ICT 的采样频率,国内、外学者做了大量研究,主要集中在 2D-CT 方面. 文献[3-4]研究了 1/4 探测器偏置的 2D-CT 扫描方法,通过间隔 180° 的两次投影实现采样频率加倍. 但由于该方法双倍采样效果只出现在中心射线位置,其他位置只是近似,具有位置依赖性,所以限制了其应用. 为克服这个问题,文献[3, 5-6]研究了通过抖动或偏转射线源焦点实现采样频率加倍的方法,在医学 CT 中得到了成功应用. 但这种技术在 ICT 系统中难以采用,因为 ICT 系统很少采用焦点可变的射线源. 文献[7-8]还研究了分度扫描和相叠采样扫描技术,通过多次低采样频率扫描实现采样频率加倍. 但这种方法严重降低了扫描速度.

基于上述分析,本文研究了 1/4 面阵探测器偏置 3D-ICT 扫描方法,并推导了其基于平行束特点的投影预处理方法和重建算法,提高了 3D-ICT 水平方向的重建空间分辨率.

1 1/4 面阵探测器偏置扫描原理

图 1(a)为标准单圆轨道锥束 3D-ICT 扫描原理. 检台旋转中心、探测器中心与焦点中心位于中心射束上,三点共线. 检台旋转 360°,FDK 型 3D-ICT 重建算法即可根据探测器采集的投影数据重构出物体的层析图像.

图 1(b)为本文提出的 1/4 面阵探测器偏置

的锥束 3D-ICT 扫描原理. 首先,探测器中心相对于检台旋转中心偏置 1/4 个探测通道宽度;然后,检台旋转 360°,探测器接受被物体衰减后的射线投影;最后,根据下文推导的 ICT 重建算法即可重构出物体的层析图像.

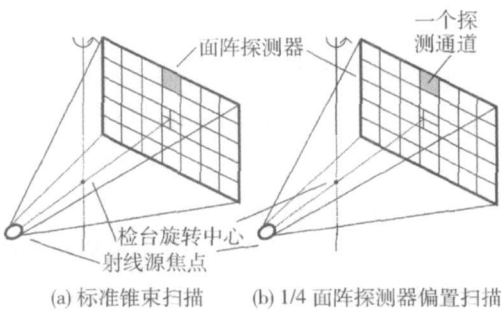


图 1 1/4 面阵探测器偏置锥束扫描原理

Fig. 1 Principle of quarter detector offset cone beam scan

2 重建算法

基于 1/4 面阵探测器偏置的锥束扫描 3D-ICT 的重建算法基本思路是: 首先,推导中心平面扫描结构对应的 1/4 探测器偏置的扇束扫描 2D-ICT 的重建算法; 然后,通过几何修正,将该算法近似应用到非中心平面,实现 3D-ICT 重建.

2.1 1/4 探测器偏置的 2D ICT 重建算法

图 1(b)的中心平面形成的扫描结构如图 2 所示. 其采样频率加倍的投影预处理和重建算法推导思路如下:

首先,将偏置扫描的扇束投影数据重排成偏置扫描的平行束数据; 然后,利用间隔 180° 的两次平行束采样数据,获得采样频率加倍的平行束数据; 最后,利用平行束扫描对应的重建算法进行重建.

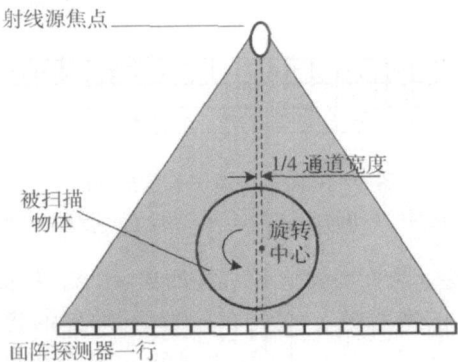


图 2 1/4 探测器偏置扇束 2D-ICT 扫描原理

Fig. 2 Principle of fan beam 2D-ICT quarter detector offset scan

2.1.1 扇束数据到平行束数据的重排^[9]

将扇束投影 $p(s, \beta)$ 重排成平行束投影 $p(x_r, \phi)$, 即是在地址空间 (s, β) 和 (x_r, ϕ) 之间进行变换. 其中, β 是扇束扫描旋转角度, s 是探测器上探测单元的编号, ϕ 是平行束扫描旋转角度, x_r 是探测器上探测单元的编号.

在扇束和平行束参数间有如下关系:

$$\phi = \beta + \gamma = \beta + \arctg(s/D),$$

$$x_r = s \cos \gamma = sD / \sqrt{D^2 + s^2}$$

根据上式, 可建立等距线阵探测器条件下, 平行束和扇束投影间的变换关系, 从而实现扇束数据的平行束重排. 重排算法详细推导参见文献[9].

2.1.2 1/4 平行束偏置扫描原理

图3为1/4探测器偏置平行束扫描结构. 在此结构下, 物体旋转 180° (等效为射线源与探测器同步旋转 180°) 后, 探测器的两次采样形成了如图4所示的结构, 从而可实现采样频率加倍. 详细的推导过程如下.

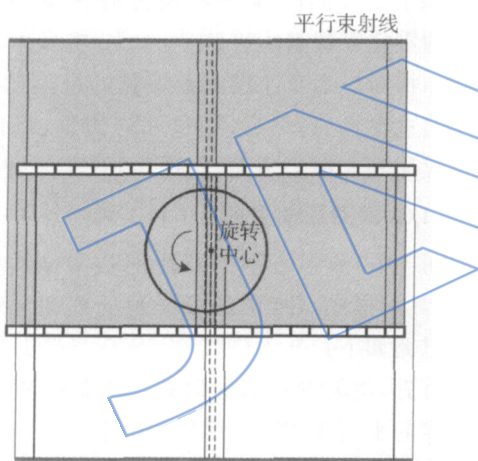


图3 相隔 180° 的两次平行束采样位置关系

Fig. 3 Position relationship between two parallel beam samples with an interval 180°

H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
B	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

图4 采样频率加倍关系推导图

Fig. 4 Principle of sampling frequency double

设 p 为探测器上任一探测单元, A_p 为采样间距 $2d$ 探测器的 p 探元在位置 A 采集的投影数据; B_p 为采样间距 $2d$ 探测器的 p 探元在位置 B 采集的投影数据; H_p 为采样间距 d 探测器的 p 探元在位置 H 采集的投影数据. 采样间距越大, 投影数据值越大, 采样频率越低. 面临的情况是,

我们要以采样间距 $2d$ 探测器在 A 和 B 采集的投影数据 A_p 和 B_p 获取采样间距 d 探测器在 H 采集的投影数据.

显然, 依据图4有如下关系. 只要求出 H_0 , 可以依次求出 H_1, H_2 和 H_3 等, 从而实现采样频率加倍. 在起始, 可以认为 $H_0 = A_0/2$.

$$A_p = H_{2p} + H_{2p+1}, \quad A_{p+1} = H_{2p+2} + H_{2p+3}$$

$$B_p = H_{2p+1} + H_{2p+2}, \quad B_{p+1} = H_{2p+3} + H_{2p+4}$$

因此

$$H_{2p+1} = A_p - H_{2p}, \quad H_{2p+2} = B_p - H_{2p+1}$$

$$H_{2p+3} = A_{p+1} - H_{2p+2}, \quad H_{2p+4} = B_{p+1} - H_{2p+3}$$

2.1.3 平行束重建算法

经过上述第2.1.1和2.1.2两步预处理后, 形成图5所示的平行束扫描方式. 即可根据该扫描方式的如下重建公式进行CT重建. 其中, 待重建点射线衰减系数为 $f(x, y)$, 在投影角度 ϕ 获得的投影值为 $p(x_r, \phi)$.

$$f(x, y) = \int_{-\pi}^{\pi} p'(x_r, \phi) |x_r = x \cos \phi, y \sin \phi| d\phi \quad (1)$$

$$p'(x_r, \phi) = p(x_r, \phi) * h(x_r), \quad *: \text{卷积}$$

其中, $h(x_r)$ 为滤波函数; x_r 为投影地址.

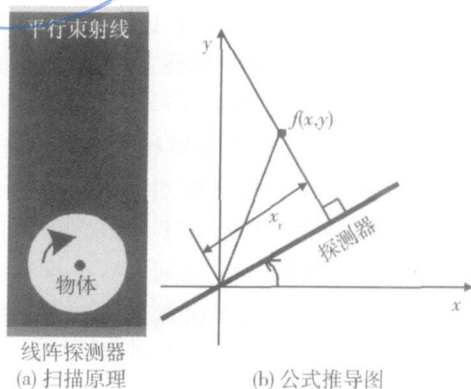


图5 平行束2D-ICT几何结构

Fig. 5 Geometry layout of parallel beam 2D-ICT

2.2 1/4探测器偏置的3D ICT重建算法

2.2.1 非中心平面投影数据的平行束重排

非中心平面投影数据的平行束重排依据2.1.1部分的中心平面投影数据平行束重排算法, 引入非中心平面的高度坐标 Z , 对其进行几何修正. 重排公式如下:

$$\phi = \beta + \gamma = \beta + \arctg(s/D'),$$

$$x_r = s \cos \gamma = sD' / \sqrt{D'^2 + s^2}$$

其中: $D' = \sqrt{D^2 + Z^2}$.

经过上述重排, 图 1(b) 扫描结构将变成图 6(a) 所示扫描结构. 为反投影方便, 将图 6(a) 近似成图 6(b) 形式.

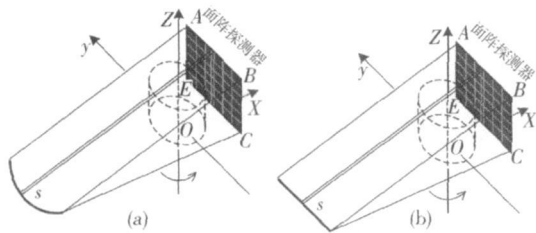


图 6 1/4 探测器偏置扫描平行锥束重排结构
Fig. 6 Rebin layout of parallel cone beam quarter detector offset scan

2.2.2 采样频率

将 2.1.2 部分算法近似应用到图 6(b) 所示的小锥角非中心平面, 从而实现 y 方向采样频率加倍, 形成如图 7 所示的扫描结构.

2.2.3 滤波反投影重建

这里, 根据 FDK 重建思路, 推导得到该扫描结构对应的滤波反投影重建算法如下:

$$f(x, y, z) = \int_0^\pi U p^\beta(Y, Z) d\beta$$

其中, $U = \frac{D}{\sqrt{D^2 + Z^2}}$ 为加权因子, $p^\beta(Y, Z) = \int_{-\infty}^\infty p(Y, Z) * h(Y) dY$ 为滤波后投影, $p^\beta(Y, Z)$ 为 β 旋转角度下, 探测器采集的二维投影数据.

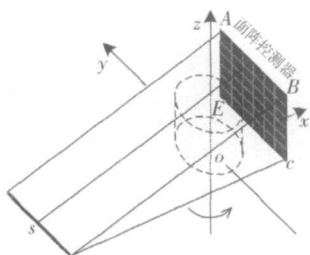


图 7 类平行锥束扫描结构

Fig. 7 Scan layout of quasi parallel beam

3 计算机仿真

为了验证本文三维 CT 扫描方式和重建算法的正确性, 对如图 8 所示模型进行了模拟仿真. 模拟条件如下(单位为: 个像素):

射线源到旋转轴距离 1200; 探测器通道数 $192 * 120$;
重构图像尺寸 $384 * 384$; 360° 范围内采样幅数 360.

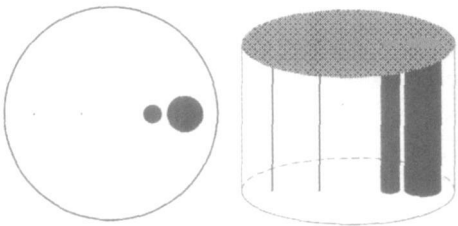


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation phantom

图 9 给出了仿真结果. 图 10 是依据文献[8]方法测得的应用本文方法前后 CT 重建的调制传递函数(MTF)曲线. 从图 10MTF 曲线可见, 在调制为 10% 时, 传统方法可分辨频率为 2 的特征, 而本文方法达到 4 左右, 空间分辨率提高近一倍.

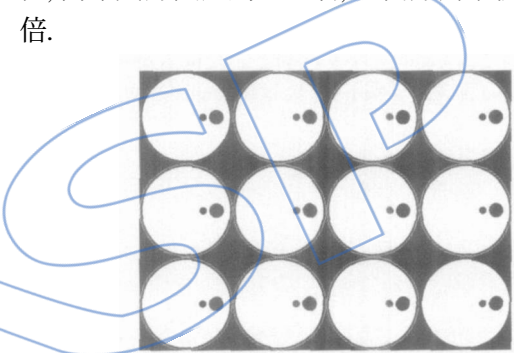


图 9 3D ICT 重建典型层图像

Fig. 9 Typical 3D ICT images

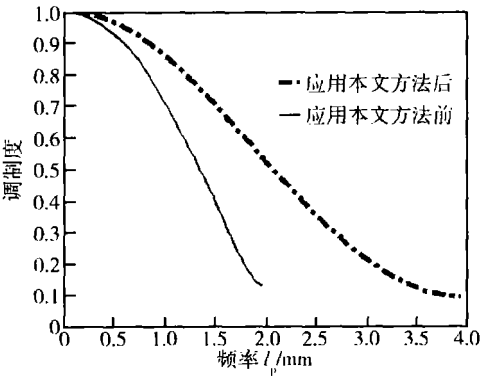


图 10 本文方法成像 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves of the proposed method

4 结 论

本文利用平行射束扫描具有的间隔 180° 的投影数据间存在对称性的特点, 通过圆轨道锥束扫描数据到类平行锥束扫描数据的重排, 实现了 1/4 探测器偏置扫描投影数据在水平方向采样频

率加倍,从而实现了CT图像空间分辨率在水平方向的提高.计算机仿真结果证明了该算法的正确性和有效性.

参考文献:

- [1] 程云勇,张定华,赵歆波,等.涡轮叶片锥束体积CT检测软件原型[J].中国机械工程,2005,16(20):1835-1838.
CHENG Yunyong, ZHANG Dinghua, ZHAO Xinbo, et al. Software prototype of the turbine blade cone beam volume CT inspection system[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(20): 1835-1839.
- [2] 程云勇,张定华,毛海鹏,等.一种基于工业CT的航空发动机涡轮叶片生产检测系统关键技术研究[J].制造技术与机床,2004(1):27-30.
CHENG Yunyong, ZHANG Dinghua, MAO Haipeng, et al. Research on key techniques of inspection system for aero engine turbine blade based on industrial CT[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2004, (1): 27-30.
- [3] Hsieh J. Computed tomography principles, designs, artifacts, and recent advances [M]. Bellingham, WA: SPIE, 2003.
- [4] Hsieh J. Optimization of detector geometry for aliasing artifact reduction in the third generation CT [J]. SPIE Vol. 3032: 204-212, 1997.
- [5] Lonn A H. Comuted tomography system with translatable focal spot[P]. U SA: 5173852, 1990.
- [6] Kachelrieß M. CT basics from single slice to cone beam spiral CT[EB/OL]. <http://www.imp.uni-erlangen.de>, 2005.
- [7] 张朋,郭明焕.由相叠的低分辨率扇形束投影数据重建高分辨率CT图像[J].核技术,2002,25(10):805-810.
ZHANG Peng, GUO Minghuan. Reconstructing high resolution image from overlapped low resolution fan beam projections data [J]. Nuclear Techniques, 2002, 25(10): 805-810.
- [8] Keat N. Understanding imaging performance(I)-spatial resolution and Z-sensitivity [EB/OL]. <http://www.imp.uni-erlangen.de>, 2005.
- [9] FU Jian, LU Hongnian. Research of large field of view scan mode for industrial CT[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(1): 59-64.