

一种迭代的锥束计算机层析成像系统几何 全参数标定方法

王敬雨, 韩 玉, 李 磊, 席晓琦, 刘建邦, 闫 镔

信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002

摘要 计算机层析成像(CL)系统对于扁平状物体的检测具有独特的优势,几何参数标定是 CL 系统获得高质量图像的重要步骤。现有 CL 系统几何参数标定方法仅能标定部分几何参数,难以一次完成所有几何参数的标定。借鉴计算机断层成像(CT)系统几何参数标定方法,提出了一种高精度的迭代标定方法,利用简单体模快速标定 CL 系统的所有几何参数。对 CT 系统几何参数标定方法用于 CL 系统的有效性进行分析,确定对 CT 系统几何参数标定方法敏感的 CL 系统几何参数;根据 CL 系统投影几何关系,构建新的反映 CL 实际系统与理想系统间误差的非线性最小二乘目标函数,利用迭代法不断优化敏感参数和其他关键参数。实验结果表明,本文方法能够有效标定 CL 系统所有几何参数,敏感参数以及受敏感参数影响的其他几何参数标定精度均有明显提升。利用已标定的几何参数重建三维 Shepp-Logan 体模和印刷电路板体模,重建图像中没有几何伪影,验证了算法的有效性。

关键词 成像系统; 几何参数标定; 迭代法; 敏感参数; 锥束计算机层析成像

中图分类号 TP391; O434.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0811003

An Iterative All-Geometric-Parameter Calibration Method for Cone-Beam Computed Laminography System

Wang Jingyu, Han Yu, Li Lei, Xi Xiaoqi, Liu Jianbang, Yan Bin

College of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China

Abstract Computed laminography (CL) has a unique advantage for the inspection of flat objects. Geometric parameter calibration of the CL system is an important step in acquiring high quality reconstruction images. However, the existing calibration methods for the CL system can not solve all parameters in one calibration. A novel iterative geometric parameter calibration method based on the classical method for computed tomography (CT) is proposed, which can calibrate all geometric parameters by using a simple phantom. Firstly, the CT calibration method is applied to the CL system to determine the parameter sensitive to the CT method. Secondly, a new non-linear least square cost function according to the error between the practical system and the ideal system is presented, thus the sensitive parameter and other parameters are optimized by the iterative method. Experimental results prove that the proposed method can accurately calibrate all the geometric parameters, and the precision of the sensitive parameter as well as those affected by the sensitive parameter are all significantly improved. Meanwhile, the corrected geometric parameters are used to reconstruct the Shepp-Logan phantom and the printed circuit board phantom, and there are no geometric artifacts in the reconstructed images, which prove the validity of the proposed method.

Key words imaging systems; geometric parameter calibration; iterative method; sensitive parameter; cone-beam computed laminography

OCIS codes 110.4500; 340.7440; 100.2000

收稿日期: 2017-03-10; 收到修改稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61372172,61601518)

作者简介: 王敬雨(1988—),男,硕士研究生,主要从事 CT、CL 数据校正和图像重建方面的研究。

E-mail: wjy_xxgc@163.com

导师简介: 闫 镔(1976—),男,博士,教授,主要从事成像技术与智能信息处理方面的研究。

E-mail: ybspace@hotmail.com(通信联系人)

1 引 言

计算机断层成像(CT)技术能够无损地获得被检测物体的内部三维结构信息,重建物体三维图像,被广泛应用于无损检测^[1]、医疗诊断^[2]等领域。实际应用中,对集成电路、印刷电路板(PCB)等大尺寸扁平状物体进行成像时,由于受到检测空间和射线能量的限制,CT成像效果并不理想。为避免这种限制,计算机层析成像(CL)技术得到了发展,该技术对于扁平状物体的检测具有独特的优势^[3]。现有CL扫描方式主要有直线型、螺旋型和旋转型^[6]。旋转型CL技术在成像时,光源与探测器不动,旋转物体,采集被成像物体的投影,通过重建算法对采集到的投影进行重建得到物体的三维图像。实现重建算法需要已知系统的几何参数,如果几何参数存在偏差将造成重建图像出现几何伪影,因此,必须对实际CL系统进行几何参数标定。

现有CL几何参数标定方法仅能标定系统部分几何参数^[9]。通过分析CL和CT的系统结构可知,CL系统中旋转轴与探测器面不平行,存在一个倾斜角 α ;而在传统CT系统中旋转轴与探测器面近似平行。因此,理论上不受 α 角影响的CT系统几何参数标定方法都可以被CL系统所借鉴。现有CT系统几何参数标定方法中,一类通常忽略角度 α ,只能标定部分几何参数^[11];另一类能标定所有几何参数,但通常需要复杂的标定体模^[14]。2014年,Zhang等^[16]提出了一种迭代的基于双球定标体模的锥束CT圆轨迹几何参数标定方法。该方法所用定标体模简单,能够标定所有几何参数,但是在CL系统中该方法受转轴倾斜角影响较大,部分参数标定不准确,影响了重建图像质量,所以不能直接用于CL系统。

为了通过一次标定快速得到CL系统的所有几何参数,本文对Zhang等的方法(以下简称Zhang方法)进行了改进,提出了一种迭代的CL系统几何参数标定方法,能够一次标定系统的所有几何参数。首先分析Zhang方法不能直接用于CL系统的原因并确定敏感参数;其次,基于相对误差最小化建立包含敏感参数和受敏感参数影响的其他参数的非线性最小二乘目标函数,并用高斯-牛顿算法^[17]对目标函数进行迭代求解;最后,利用数值仿真实验对该方法的收敛速度、求解精度和稳健性进行分析,并利用实验标定的几何参数进行重建实验,验证算法的有效性。

2 锥束CL系统扫描结构及其几何参数

锥束CL系统扫描结构如图1所示。引入两个三维坐标系, XYZ 是按照右手法则以探测器中心 O 为原点建立的世界坐标系, $X'Y'Z'$ 是按照右手法则以被扫描物体中心 O' 为原点建立的物体坐标系。 $S(s_x, s_y, s_z)$ 为射线源焦点坐标,它在探测器上的投影点为 $P(p_x, 0, p_z)$ 。 Z' 为被扫描物体的转轴,主射线 SP 与 Z' 轴垂直,垂足为 $Q(q_x, q_y, q_z)$ 。从几何结构上看,CL系统与CT系统的区别在于转轴 Z' 与 Z 轴不再平行,存在一个倾斜角 α 。定义 Z' 在探测器上的投影与 Z 轴的夹角为旋转轴的偏转角 η , SP 长度与 SQ 长度之比为几何放大比 t 。该系统需要标定的全部几何参数如下:射线源焦点坐标 $S(s_x, s_y, s_z)$ 、射线源焦点投影坐标 $P(p_x, 0, p_z)$ 、转轴旋转角 η 以及几何放大比 t 。

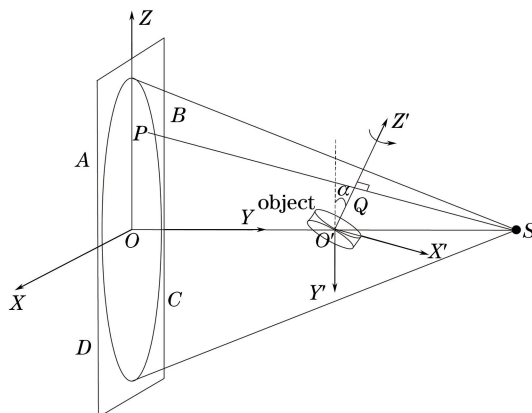


图1 锥束CL系统扫描结构

Fig. 1 Scanning configuration of the cone beam CL system

3 迭代的锥束 CL 系统几何全参数标定算法

3.1 确定 CL 系统敏感参数

通过对 Zhang 方法用于 CL 系统的有效性进行分析,确定 CL 系统几何参数中对 Zhang 方法敏感的参数。Zhang 方法主要分为两个步骤:1)求得转轴投影方程和隐消线方程^[18],根据这两个方程可求得转轴偏转角和射线源焦点在探测器上的投影坐标;2)利用双球定标体模的投影,根据两小球球心的投影轨迹为椭圆的特性,拟合出上下两椭圆的中心坐标,即可得到过这两个中心点的直线方程,该直线方程近似为转轴投影方程,由转轴投影方程即可求得转轴偏转角。三维空间中一组平行线的投影相交于一点,该点称为隐消点,由一系列隐消点组成了隐消线^[18]。借鉴隐消线的思想,在两小球旋转轨迹中分别采样若干个,这些点中每四个点构成一组平行线,则可以得到一系列平行线在探测器上形成的隐消线方程,隐消线方程与转轴投影方程的交点即为射线源焦点在探测器上的投影坐标。其次,通过系统几何的误差项建立包含射线源焦点坐标和系统几何放大比的目标函数,并利用高斯-牛顿迭代算法进行求解。

经分析可知将 Zhang 方法直接运用于 CL 系统几何参数标定中存在两个问题:1)射线源焦点投影纵坐标 p_z 对该方法敏感,因为 CL 系统存在的倾斜角 α 使球心投影轨迹所形成的椭圆更加扁平,隐消线求解误差增大,进而造成 p_z 求解误差增大;2)Zhang 方法在迭代求解射线源交点坐标 $S(s_x, s_y, s_z)$ 和几何放大比 t 的过程中将 p_z 作为真值, p_z 与后续参数的求解直接相关, p_z 的求解不准确会进一步影响 $S(s_x, s_y, s_z)$ 和 t 的准确求解。因此, p_z 为 CL 系统几何参数中对 Zhang 方法敏感的参数, Zhang 方法直接运用于 CL 系统几何参数标定中会使部分参数求解误差较大。为验证上述观点,在两种噪声水平下分别重复 500 次实验,实验条件如下:探测器像素数为 $3200 \text{ pixel} \times 2304 \text{ pixel}$,单个像素尺寸为 0.127 mm ,噪声水平(n_{os})分别为 0.05、0.1,噪声是均值为 0、标准差为 $0.127n_{os}$ 的高斯白噪声,CL 系统倾斜角 α 为 40° ,小球直径为 2 mm ;其他参数设置见表 1 和表 2 中的真值。实验结果如表 1 和表 2 所示。

从实验结果可以看出,0.05 噪声水平下 p_z 的绝对误差从 0.203 增加到 6.984,0.1 噪声水平下 p_z 的绝对误差从 0.304 增加到 6.547, p_z 误差明显增大,证明了 p_z 为敏感参数。并且在迭代求解 $S(s_x, s_y, s_z)$ 的过程中将 p_z 作为真值,造成 $S(s_x, s_y, s_z)$ 的求解误差增大。

表 1 参数标定结果(噪声水平:0.05)

Table 1 Parameter calibration results with noise level of 0.05

Parameter	Zhang's method in CT system		Zhang's method in CL system	
	Real value	Measured value	Real value	Measured value
$\eta / (^\circ)$	0.035	0.034	0.029	0.028
p_x / mm	4.587	4.595	39.861	39.657
p_z / mm	0.664	0.867	1212.932	1205.948
s_x / mm	5	5.039	5	4.836
s_y / mm	1450	1450.025	1450	1445.835
s_z / mm	-2	-0.456	-2	3.771
t	7.250	7.252	12.242	12.209

表 2 参数标定结果(噪声水平:0.1)

Table 2 Parameter calibration results with noise level of 0.1

Parameter	Zhang's method in CT system		Zhang's method in CL system	
	Real value	Measured value	Real value	Measured value
$\eta / (^\circ)$	0.035	0.034	0.029	0.028
p_x / mm	4.587	4.573	39.861	39.649
p_z / mm	0.664	0.360	1212.932	1206.385
s_x / mm	5	5.049	5	5.529
s_y / mm	1450	1449.781	1450	1447.381
s_z / mm	-2	-1.362	-2	5.069
t	7.250	7.252	12.242	12.201

3.2 CL 系统几何参数迭代标定方法

针对 Zhang 方法不能直接应用于 CL 系统几何参数标定的问题,提出了一种迭代的几何全参数标定方法。首先,利用隐消线原理和小球投影轨迹为椭圆的几何特性计算旋转轴偏转角 η 和射线源焦点投影横坐标 p_x 。其次,构建包含敏感参数 p_z (射线源焦点投影纵坐标)和受敏感参数影响的其他参数的目标函数,并利用高斯-牛顿算法进行求解。

3.2.1 计算 η 和 p_x

在 360° 范围内均匀选取 120 个采样点(每隔 3° 取一个),并根据这些采样点模拟校正体模的 120 个投影。体模投影为上下两个椭圆,CL 系统倾斜角为 40° 时体模投影如图 2 所示。根据体模投影可以拟合出两个椭圆的中心,由此得到旋转轴投影方程,即过上下椭圆中心的直线方程为

$$A_1 X + B_1 Y + C_1 Z = 0. \quad (1)$$

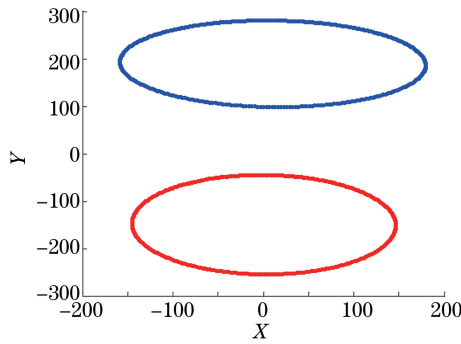


图 2 体模投影

Fig. 2 Projections of phantom

根据 3.1 节所述隐消线理论^[18]可求得隐消线方程为

$$A_2 X + B_2 Y + C_2 Z = 0. \quad (2)$$

由(1)式转轴投影所在直线与 Z 轴的夹角即可求得转轴偏转角 η 。射线源焦点投影为转轴投影与隐消线的交点,所以由(1)式和(2)式可求得射线源焦点投影坐标 $P(p_x, 0, p_z)$ 。

3.2.2 构建目标函数

由 3.1 节可知射线源焦点投影坐标为 $P(p_x, 0, p_z)$,设射线源焦点坐标为 $S(s_x, s_y, s_z)$,几何放大比为 t , SP 与 Z' 的交点坐标为 $Q(q_x, q_y, q_z)$ 。根据系统的几何关系,可得到两小球旋转轨迹上每个采样点的坐标分别为 (X_1^n, Y_1^n, Z_1^n) 和 (X_2^n, Y_2^n, Z_2^n) ,且到其相应旋转中心的距离分别为 r_1^n 和 $r_2^n, n=1, 2, \dots, 120$,则上下两组相对应的采样点之间的距离可表示为

$$d_n = [(X_1^n - X_2^n)^2 + (Y_1^n - Y_2^n)^2 + (Z_1^n - Z_2^n)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

因为小球实际运动轨迹与理想轨迹之间存在误差,所以引入 e_{1n}, e_{2n} 和 e_{3n} 误差,

$$\begin{cases} e_{1n} = \sum_{m=1}^n \left(\frac{r_1^m - \bar{r}_1}{\bar{r}_1} \right)^2 \\ e_{2n} = \sum_{m=1}^n \left(\frac{r_2^m - \bar{r}_2}{\bar{r}_2} \right)^2, \\ e_{3n} = \sum_{m=1}^n (d_m - d)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\bar{r}_1 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n r_1^m$ 为上小球旋转轨迹上采样点到其中心的平均距离, $\bar{r}_2 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n r_2^m$ 为下小球旋转轨迹上采样点到其旋转中心的平均距离, d 为标定体模两球心距离。

将射线源焦点投影纵坐标 p_z 、射线源焦点坐标 (s_x, s_y, s_z) 和几何放大比 t 一起作为待求变量,综合(4)式给出的 3 种误差,建立包含 $p_z, (s_x, s_y, s_z), t$ 的目标函数 $F(p_z, s_x, s_y, s_z, t)$:

$$F(p_z, s_x, s_y, s_z, t) = \sum_{n=1}^m (e_{1n} + e_{2n} + e_{3n})。 \quad (5)$$

3.2.3 求解目标函数

系统没有几何误差的情况下满足 $F(p_z, s_x, s_y, s_z, t) = 0$, 所以为了使得到的几何参数尽可能准确, 要使 $F(p_z, s_x, s_y, s_z, t)$ 的值尽可能小。 $F(p_z, s_x, s_y, s_z, t)$ 具有非线性最小二乘解的形式, 因此可以采用最优化理论与算法进行求解, 本文采用的求解算法为高斯-牛顿算法^[17], 具体过程如下:

1) 两球球心距离 d 为常数, 优化过程中保持不变, 将通过隐消线求解得到的 p_z 和存在误差的机械系统的读数作为算法初值;

2) 计算第 k 次迭代的雅可比矩阵 \mathbf{J} , $j_{ij} = \partial e_i / \partial X_j$, 即计算误差向量的第 i 个误差关于决策向量的第 j 个参数的偏导;

3) 计算增益矩阵:

$$\Delta \mathbf{X} = -(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k)^{-1} \mathbf{J}_k^T \mathbf{e}_k; \quad (6)$$

4) $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \Delta \mathbf{X}$, 更新参数, 直到满足终止条件, 终止条件设为 $|\Delta \mathbf{X}| < \epsilon$, 其中 $\epsilon = 10^{-6}$ 。

4 实验结果与分析

为了验证迭代的锥束 CL 系统几何参数标定方法, 通过数值仿真对本文方法的求解精度和稳健性进行定量分析。实验条件为: 探测器像素数为 $3200 \text{ pixel} \times 2304 \text{ pixel}$, 单个像素尺寸为 0.127 mm , 噪声水平 n_{os} 分别为 $0.05, 0.1$, 噪声是均值为 0 、标准差为 $0.127n_{os}$ 的高斯白噪声, $\alpha = 40^\circ$, 小球直径为 2 mm , 在两种噪声水平下分别重复实验 500 次, 其他参数的设置见表 3 和表 4 中的真值。图 3 为目标函数 F 的收敛曲线, 图 4 为 F 满足收敛终止条件后最终的相对误差, 表 3 和表 4 为不同噪声水平下几何参数的标定结果。

表 3 参数标定结果(噪声水平:0.05)

Table 3 Parameter calibration results with noise level of 0.05

Parameter	Real value	Zhang's method	Proposed method
$\eta / (^\circ)$	0.029	0.028	0.028
p_x / mm	39.861	39.657	39.742
p_z / mm	1212.932	1205.948	1212.919
s_x / mm	5	4.836	5.055
s_y / mm	1450	1445.835	1451.483
s_z / mm	-2	3.771	-0.261
t	12.242	12.209	12.231

表 4 参数标定结果(噪声水平:0.1)

Table 4 Parameter calibration results with noise level of 0.1

Parameter	Real value	Zhang's method	Proposed method
$\eta / (^\circ)$	0.029	0.028	0.028
p_x / mm	39.861	39.649	39.673
p_z / mm	1212.932	1206.385	1212.971
s_x / mm	5	5.529	5.089
s_y / mm	1450	1447.381	1450.921
s_z / mm	-2	5.069	-0.929
t	12.242	12.201	12.225

图 3 表明本文方法的收敛速度较快, 在迭代 40 多次时目标函数趋向收敛。图 4 表明最终的相对误差较小, 在 $\pm 0.05\%$ 范围内。表 3 和表 4 表明, 与 Zhang 方法相比, 在 0.05 噪声水平和 0.1 噪声水平下, 本文方法对射线源焦点投影纵坐标 p_z 的标定精度有明显提升, p_z 的绝对误差分别从 6.984 降低到 0.013 、从 6.547 降低到 0.039 。受益于 p_z 标定精度的提升, 本文方法对射线源焦点坐标 (s_x, s_y, s_z) 和几何放大比 t 的标定精度也得到了提高。表 3 表明, 在 0.05 噪声水平下, 本文方法对 (s_x, s_y, s_z) 以及 t 的标定精度较 Zhang 方法均有提高, s_x 的绝对误差从 0.164 降低到 0.055 , s_y 的绝对误差从 4.165 降低到 1.483 , s_z 的绝对误差从

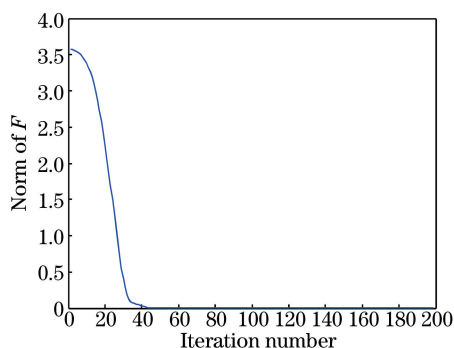


图 3 F 的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of F

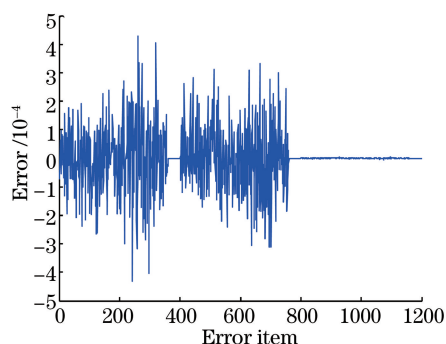


图 4 最终相对误差

Fig. 4 Final relative error

5.771降低到 1.739, t 的绝对误差从 0.032 降到 0.011。表 4 表明,在 0.1 噪声水平下,本文方法对 (s_x, s_y, s_z) 以及 t 的标定精度较 Zhang 方法均有提高, s_x 的绝对误差从 0.529 降低到 0.089, s_y 的绝对误差从 2.619 降低到 0.921, s_z 的绝对误差从 7.069 降低到 1.071, t 的绝对误差从 0.041 降到 0.017。在两种噪声水平下,本文方法求解精度变化不大,因此本文方法具有较强的稳健性。

为进一步验证算法的有效性,利用噪声水平较高时(表 4)的 Zhang 方法校正结果及本文方法校正结果分别对三维 Shepp-Logan 体模和 PCB 体模进行仿真重建实验。三维 Shepp-Logan 体模重建矩阵规模为 $256 \times 256 \times 256$, PCB 体模重建矩阵规模为 $360 \times 360 \times 360$,重建结果分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 重建图像可以看出, Zhang 方法校正结果不准确,造成重建图像中存在明显的几何伪影,图像质量差。而本文方法校正结果精确,重建图像中没有几何伪影,验证了本文方法的有效性,但 CL 特性使得扫描投影数据会有部分缺失,造成重建图像中出现数据缺失引起的伪影和层间混叠。

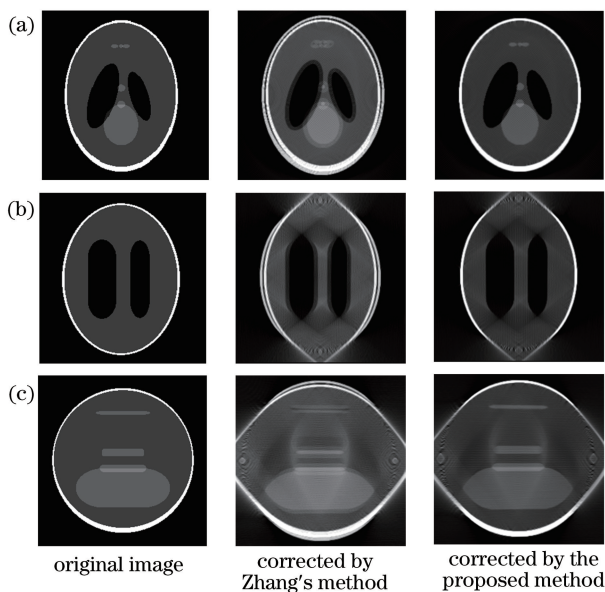


图 5 Shepp-Logan 体模重建结果。(a) XY 面切片图像;(b) XZ 面切片图像;(c) YZ 面切片图像

Fig. 5 Reconstruction results of Shepp-Logan phantom. (a) Images of XY slice;

(b) images of XZ slice; (c) images of YZ slice

5 结 论

基于锥束 CT 系统中经典的几何参数标定方法,提出了一种锥束 CL 系统几何全参数标定方法,能够通过一次标定得到系统的所有几何参数。仿真结果表明,本文方法收敛速度快、稳健性较强、计算精度高。相比 Zhang 方法,本文方法对敏感参数以及受敏感参数影响的几何参数的标定精度均有明显提升。利用本文

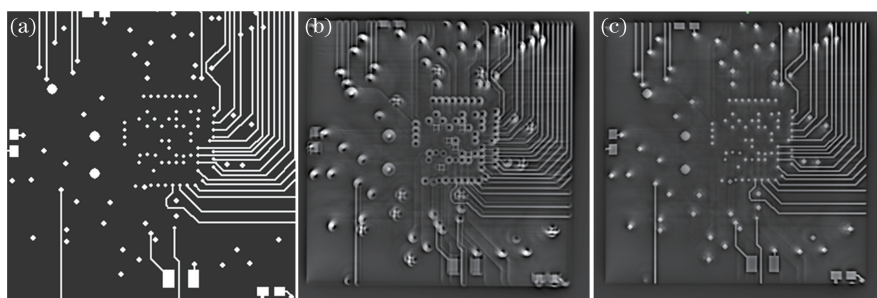


图 6 PCB 体模第二层重建结果。(a)理想图像;(b) Zhang 方法校正后图像;(c)本文方法校正后图像
Fig. 6 Reconstruction results of the PCB phantom. (a) Ideal image; (b) image corrected by Zhang's method;
(c) image corrected by the proposed method

方法校正系统几何参数后对 Shepp-Logan 体模和 PCB 体模进行重建,重建图像中没有几何伪影,验证了本文方法的有效性。但 CL 系统扫描结构特性使得采集到的投影数据有一部分缺失,造成重建图像中存在伪影和层间混叠,如何改善因数据缺失引起的伪影和层间混叠是下一步需要深入研究的工作。

参 考 文 献

- [1] Vavrik D, Dammer J, Jakubek J, *et al.* Advanced X-ray radiography and tomography in several engineering applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2011, 633(S1): 152-155.
- [2] Chen Siyu, Li Lei, Yan Bin, *et al.* Ring artifacts correction method based on dynamic current for cone beam CT[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0634001.
陈思宇, 李 磊, 闫 斌, 等. 基于动态电流的锥束 CT 环状伪影校正方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0634001.
- [3] Cho M K, Youn H, Jang S Y, *et al.* Cone-beam digital tomosynthesis for thin slab objects [J]. NDT & E International, 2012, 47(2): 171-176.
- [4] Liu T. Cone-beam CT reconstruction for planar object[J]. NDT & E International, 2012, 45(1): 9-15.
- [5] Gondrom S, Zhou J, Maisl M, *et al.* X-ray computed laminography: an approach of computed tomography for applications with limited access[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 190(1): 141-147.
- [6] Fu J, Jiang B H, Li B. Large field of view computed laminography with the asymmetric rotational scanning geometry [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(8): 2261-2271.
- [7] Yang M, Wang G, Liu Y Z. New reconstruction method for X-ray testing of multilayer printed circuit board[J]. Optical Engineering, 2010, 49(5): 056501.
- [8] Que J M, Cao D Q, Zhao W, *et al.* Computed laminography and reconstruction algorithm [J]. Chinese Physics C, 2012, 36(8): 777-783.
- [9] Yang M, Zhang J H, Yuan M D, *et al.* Calibration method of projection coordinate system for X-ray cone-beam laminography scanning system[J]. NDT & E International, 2012, 52: 16-22.
- [10] Yang M, Zhu J H, Liu Q, *et al.* A practical method to calibrate the slant angle of central X-ray for laminography scanning system[J]. NDT & E International, 2014, 64: 13-20.
- [11] Noo F, Clackdoyle R, Mennessier C, *et al.* Analytic method based on identification of ellipse parameters for scanner calibration in cone-beam tomography[J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(11): 3489-3508.
- [12] Yang K, Kwan A L C, Miller D W F, *et al.* A geometric calibration method for cone beam CT systems[J]. Medical Physics, 2006, 33(6): 1695-1706.
- [13] Wu D, Li L, Zhang L, *et al.* Geometric calibration of cone-beam CT with a flat-panel detector[C]. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011.
- [14] Cho Y, Moseley D J, Siewerdsen J H, *et al.* Accurate technique for complete geometric calibration of cone-beam computed tomography systems[J]. Medical Physics, 2005, 32(4): 968-983.
- [15] Sun Y, Hou Y, Zhao F Y, *et al.* A calibration method for misaligned scanner geometry in cone-beam computed tomography[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 499-513.
- [16] Zhang F, Du J P, Jiang H, *et al.* Iterative geometric calibration in circular cone-beam computed tomography [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(11): 2509-2514.
- [17] Kingston A M, Sakellariou A, Sheppard A P, *et al.* An auto-focus method for generating sharp 3D tomographic images [C]. SPIE, 2010, 7804: 78040J.
- [18] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.