

王雅霄, 魏存峰, 阙介民, 等. CL 系统扫描长方体构件的投影计算机仿真[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(1): 91-100.
Wang YX, Wei CF, Que JM, et al. Computer simulation of digital projections-of-cuboid object in CL system[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(1): 91-100.

CL 系统扫描长方体构件的投影计算机仿真

王雅霄^{1,2}, 魏存峰^{1,2}, 阙介民^{1,2}, 舒岩峰^{1,2}, 曹大泉^{1,2},
王燕芳^{1,2}, 孙翠丽^{1,2}, 史戎坚^{1,2}, 魏龙^{1,2}✉

1. 中国科学院高能物理研究所核辐射与核能技术重点实验室, 北京 100049
2. 北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心, 北京 100049

摘要: X 射线投影计算机仿真可以排除实际 X 射线断层扫描过程中的随机因素, 更好地验证扫描方式、图像重建方法等的正确性, 为实际系统的实现、完善以及重建算法的改进等提供理论依据。本文基于一种典型的计算机分层成像 (CL) 系统, 针对电子线路板大多为长方体薄板的事实, 研究了长方体构件的投影仿真计算方法; 设计了仿真芯片模体, 对其进行投影计算机仿真; 并与系统实验结果对比, 得到了较为满意的结果。该方法为后续改进图像重建算法、分析误差来源、校正伪影等研究提供了良好的基础。

关键词: X 射线检测; CL 系统; 计算机分层成像; 长方体投影

文章编号: 1004-4140 (2014) 01-0091-10 **中图分类号:** TP 319.9 **文献标志码:** A

在工程检测中, 对于多层印刷电路板、片状化石、飞机机翼、太阳能电池板等板状构件, 常规计算机断层成像技术 (Computed Tomography, CT) 效果并不令人满意。目前多采用 X 射线透视方法检测电路板的内部缺陷, 然而透视成像的缺点是无法确定缺陷的深度信息。近年来, 针对于板状构件的工业 X 射线计算机分层成像技术 (Industrial Computed Laminography, ICL) 的研究和发展令人瞩目^[1], 其特点在于, X 射线只在厚度方向穿透平板状的物体完成数据采集, 经重建得到清晰的断层图像^[2]。

但是, 由于 CL 的扫描模式为不完全扫描, 其重建算法属于非精确重建, 现有的图像重建方法各有利弊^[3]。为了改进图像重建算法, 首先要获得 X 射线投影数据。由于实际扫描系统投影过程中存在康普顿散射、射束硬化^[4]、系统机械误差、噪声等因素, 使得投影数据存在很多误差。而计算机模拟仿真投影可以尽可能地避免其他不确定因素的影响, 得到较为理想的投影数据, 还可以通过修改参数模拟这些误差, 观察和分析其对图像重建质量的影响, 为实际系统的实现和完善提供理论依据。同时, 数字投影的计算机仿真计算也可以验证扫描方式、图像重建方法等的正确性, 对重建算法的比较和改进有重要的意义。

以往的仿真计算扫描对象多为圆柱体、椭球等构件^[3, 5]。本文基于中国科学院科研装备研制项目“高分辨板状构件 CL 成像设备研制”的 CL 系统结构, 针对长方体构件, 对其进行模拟投影计算机仿真。在此基础上设计了仿真芯片模体进行投影仿真计算, 与实验室扫描结果进行对比, 验证仿真计算方法的正确性, 为 CL 系统改进图像重建算法、校正误差、

收稿日期: 2013-06-18。

基金项目: 科技部国家重大科学仪器设备开发专项 (2011YQ030112)。

去除伪影等研究提供了准确的投影数据。

1 系统结构及其坐标系

CL 系统硬件组成主要包括三部分：X 射线源、平板探测器及机械运动控制平台。本文所述的 CL 系统的空间坐标系如图 1 所示，建立如图 1 三维空间坐标系 xyz ，原点是 o 点。旋转坐标系 $x'y'z'$ ，原点是 o' 点。其中射线源在 S 点，探测器所在的平面是 xoy 平面^[6]， z' 轴与 z 轴的夹角为 φ ， $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 。扫描过程中物体以 z' 轴为旋转轴旋转，旋转角为 θ ， $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 。 $x'y'z'$ 坐标系中的点 xyz 的坐标值为：

$$(x' \ y' \ z') = (x \ y \ z - \overline{oo'}) \mathbf{R}_x(\varphi) \mathbf{R}_z(\theta) = (x \ y \ z - \overline{oo'}) \mathbf{R} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{R}_z(\theta)$ 表示绕 z 轴逆时针转 θ 角度的变换矩阵， $\mathbf{R}_x(\varphi)$ 表示绕 x 轴逆时针转 φ 角度的变换矩阵^[7]。

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\varphi) \mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta)\cos(\varphi) & \cos(\theta)\cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ \sin(\theta)\sin(\varphi) & -\cos(\theta)\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\varphi) & \sin(\theta)\sin(\varphi) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta)\cos(\varphi) & -\cos(\theta)\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z - \overline{oo'} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2 计算机仿真投影过程

2.1 仿真原理

为了获得理想的投影数据，可以通过计算机模拟的方法，如解析投影模拟、离散格点模拟和蒙特卡洛模拟^[8]等。离散格点模拟方法计算误差较大，蒙特卡洛模拟方法算法设计难度较高、计算时间长。Merbach^[9]设计了一种解析投影生成算法，首先定义几种常见的几何

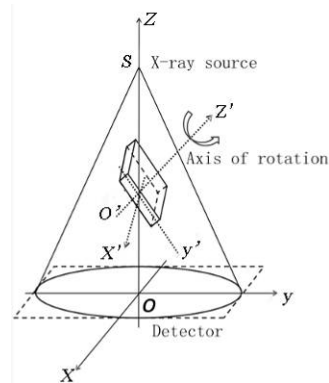


图 1 CL 系统的空间坐标系
Fig.1 The coordinate system of the CL system

体,如椭球,然后计算每条射线穿过几何体的交点,两个交点之间的距离作为投影值。在常规工业 CT 领域,圆柱型构件的计算机仿真投影比较常见;在三维医用图像重建领域,三维 Shepp-Logan 模型^[10]是仿真投影的经典模体,它由多个椭球组合而成的。

建立适合 CL 板状构件系统的仿真投影模体对于 CL 系统的改进和算法的性能评价等有着重要的意义。本文根据 CL 扫描构件的特点,用 Matlab 软件对系统进行了仿真模拟,可以实现对圆柱、椭球、长方体物体及其组合体的投影仿真计算。由于长方体型物体更接近电子线路板的形状,本文重点介绍针对长方体构件的计算机投影仿真计算过程。

单能窄束 X 射线在物质中的衰减遵循 Lambert-Beer 定律^[11]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x) \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu x \quad (7)$$

其中 I_0 、 I 分别是 X 射线通过物质前、后的强度, x 是射线穿过物质的厚度, μ 是物质的线性衰减系数。可见 $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$ 正比于 x 。本计算机仿真方法首先计算射线穿过线性衰减系数相同的均匀长方体物体的线段长度,然后根据不同物质的 X 射线衰减系数不同,乘以相对大小的系数(对应选择 0-1 之间不同大小的系数值),最后取负指数作为该射线的投影值。

2.2 射线穿过长方体的分情况讨论

从射线源 $o(0,0,\overline{os})$ 点发出的射线,到达探测器像素点 $(x_i, y_i, 0)$ 的射线方程为:

$$\frac{x-0}{x_i-0} = \frac{y-0}{y_i-0} = \frac{z-\overline{os}}{0-\overline{os}} = t \quad (8)$$

即: $x(t) = x_i \cdot t$; $y(t) = y_i \cdot t$; $z(t) = -\overline{os} \cdot t + \overline{os}$; 代入式(5)中,得到:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\varphi) & \sin(\theta)\sin(\varphi) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta)\cos(\varphi) & -\cos(\theta)\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \cdot t \\ y_i \cdot t \\ -\overline{os} \cdot t + \overline{os} - oo' \end{pmatrix} \quad (9)$$

即:

$$\begin{cases} x'(t) = (x_i \cdot \cos(\theta) - y_i \cdot \sin(\theta)\cos(\varphi) - \overline{os} \cdot \sin(\theta)\sin(\varphi)) \cdot t + \overline{os}' \cdot \sin(\theta)\sin(\varphi) \\ y'(t) = (x_i \cdot \sin(\theta) + y_i \cdot \cos(\theta)\cos(\varphi) + \overline{os} \cos(\theta)\sin(\varphi)) \cdot t - \overline{os}' \cdot \cos(\theta)\sin(\varphi) \\ z'(t) = (y_i \cdot \sin(\varphi) - \overline{os} \cdot \cos(\theta)) \cdot t + \overline{os}' \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (10)$$

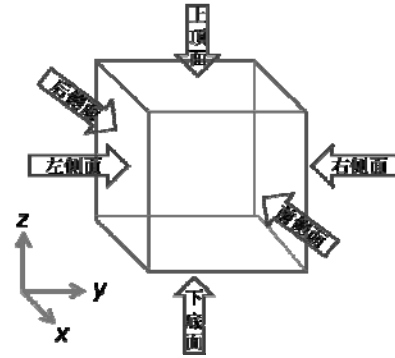


图2 长方体的六个平面

Fig.2 The six planes of the cuboid

设长方体的 x 轴方向半长为 a , y 轴方向半宽为 b , z 轴方向半高为 c 。

长方体的中心点在 $x'y'z'$ 坐标系中的坐标值为: (x_0, y_0, z_0) 。

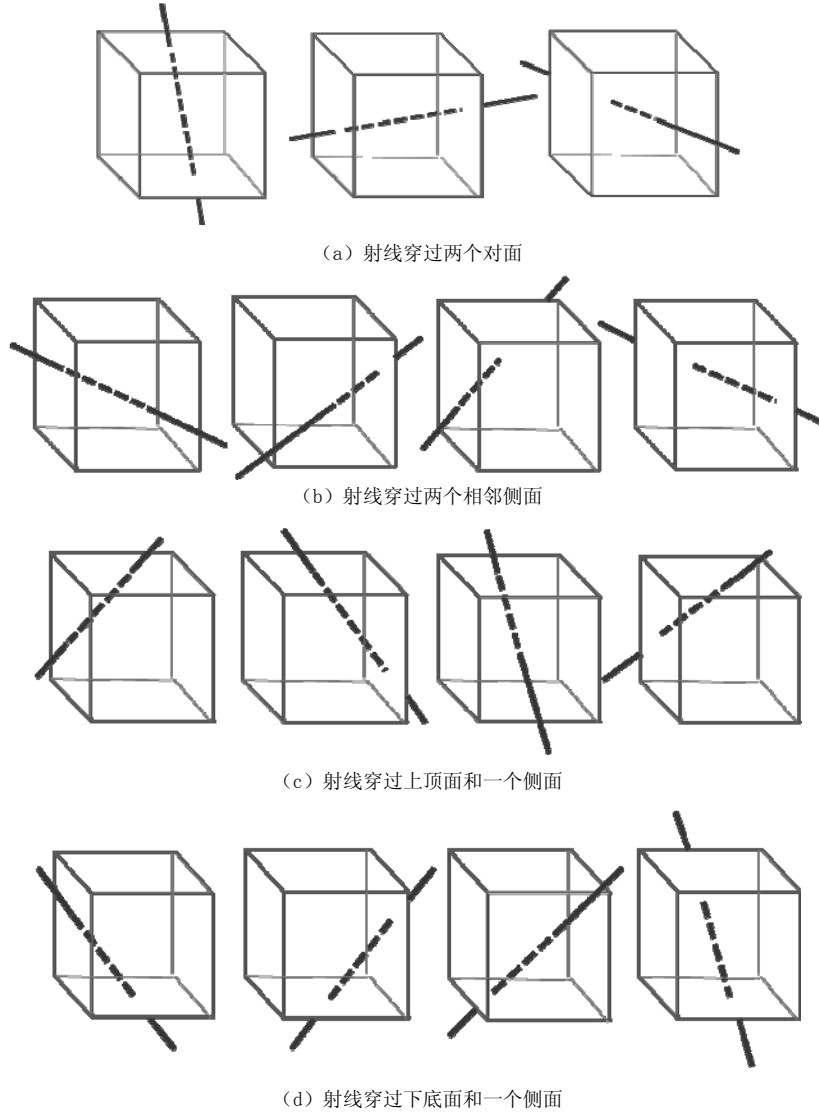


图3 射线穿过长方体的 15 种情况

Fig.3 The 15 cases of the X ray passing through cuboid

射线与长方体的六个面(上顶面,下底面,前、后、左、右四个侧面,见图 2)所在的平面相交,可以得到六个关于 t 的一元一次方程,解方程得 t 的六个解。以射线穿过长方体前、后面所在的平面为例,由于长方体的前、后面所在平面与 x 轴垂直,解两个关于 t 的一元一次方程得到两个 t 值,因此分别用 t_{x_1} 、 t_{x_2} 表示。同理可得 t_{y_1} 、 t_{y_2} 、 t_{z_1} 、 t_{z_2} , 具体如下:

(1) 射线穿过长方体前面所在的平面: $x'(t) - x_0 = a$, 解得 t_{x_1} ,

$$\text{if } |y'(t_{x_1}) - y_0| \leq b \ \&\& \ |z'(t_{x_1}) - z_0| \leq c$$

then 射线穿过长方体的前侧面;

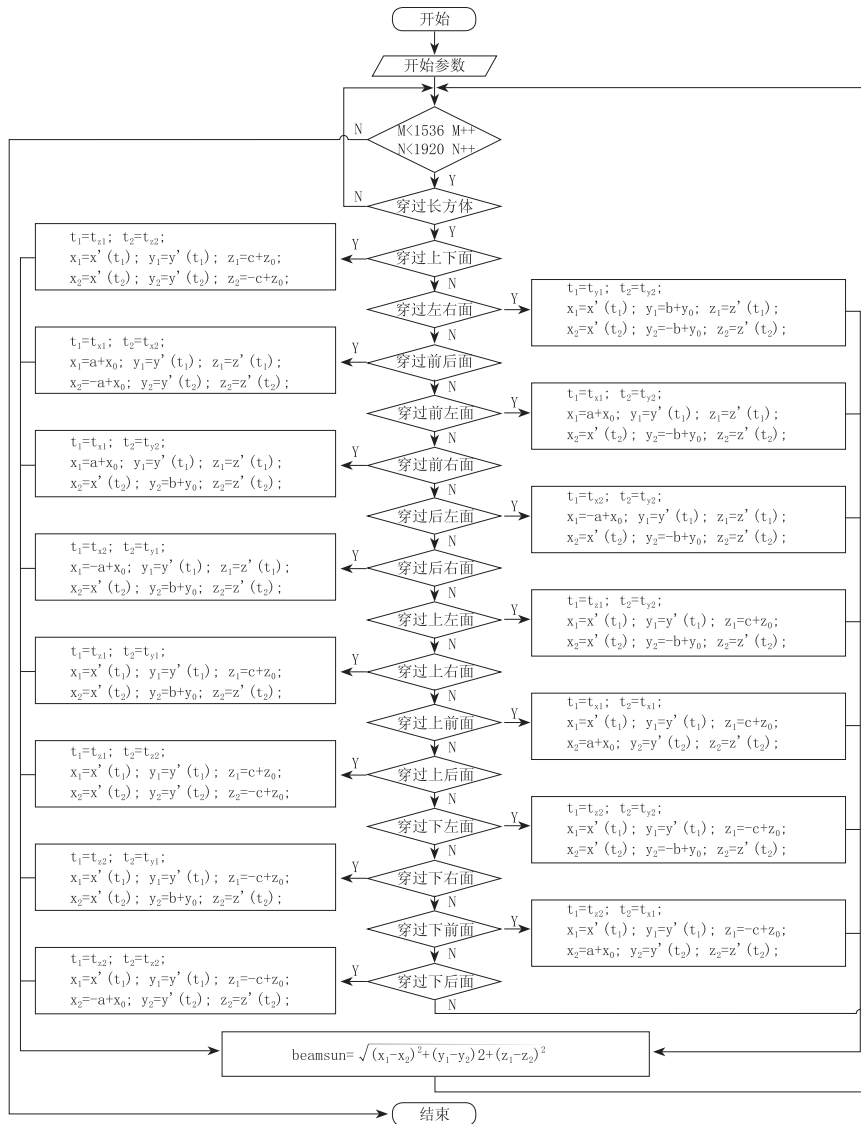


图 4 算法流程图

Fig.4 The algorithm flow chart

- (2) 射线穿过长方体后面所在的平面： $x'(t) - x_0 = -a$ ，解得 t_{x_2} ，
 if $|y'(t_{x_2}) - y_0| \leq b$ && $|z'(t_{x_2}) - z_0| \leq c$
 then 射线穿过长方体的后侧面；
- (3) 射线穿过长方体右面所在的平面： $y'(t) - y_0 = b$ ，解得 t_{y_1} ，
 if $|x'(t_{y_1}) - x_0| \leq a$ && $|z'(t_{y_1}) - z_0| \leq c$
 then 射线穿过长方体的右侧面；
- (4) 射线穿过长方体左面所在的平面： $y'(t) - y_0 = -b$ ，解得 t_{y_2} ，
 if $|x'(t_{y_2}) - x_0| \leq a$ && $|z'(t_{y_2}) - z_0| \leq c$

then 射线穿过长方体的左侧面;

(5) 射线穿过长方体上面所在的平面: $z'(t) - z_0 = c$, 解得 t_{z_1} ,

If $|x'(t_{z_1}) - x_0| \leq a \ \&\& \ |y'(t_{z_1}) - y_0| \leq b$

then 射线穿过长方体的上面;

(6) 射线穿过长方体下面所在的平面: $z'(t) - z_0 = -c$, 解得 t_{z_2} ,

If $|x'(t_{z_2}) - x_0| \leq a \ \&\& \ |y'(t_{z_2}) - y_0| \leq b$

then 射线穿过长方体的下面。

将 t_{x_1} 代入射线方程 $y'(t)$, $z'(t)$ 得 $y'(t_{x_1})$, $z'(t_{x_1})$, 判断 $y'(t_{x_1})$, $z'(t_{x_1})$ 是否在长方体平面范围内, 即 $|y'(t_{x_1}) - y_0| \leq b$, $|z'(t_{x_1}) - z_0| \leq c$ 是否同时成立, 可以判断射线是否穿过长方体的 x 轴正向的那一面。同理, 可以判断其他平面。

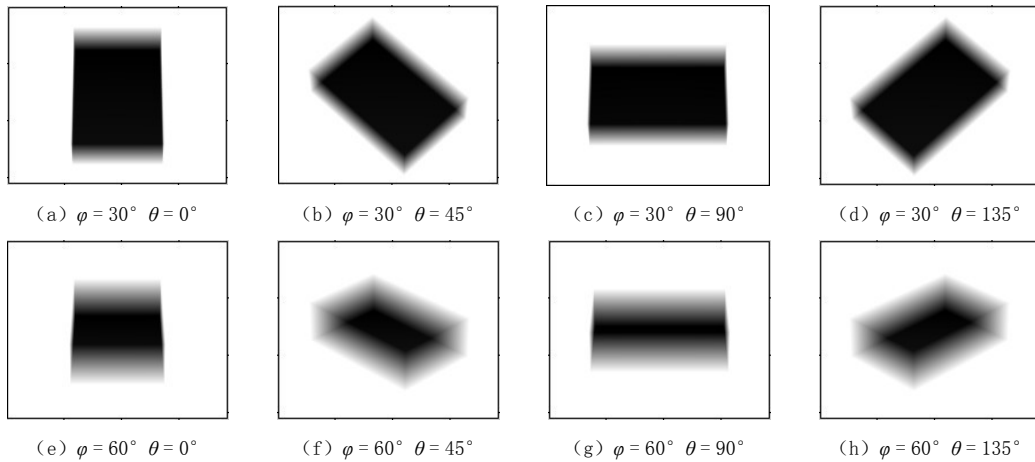


图5 不同 θ 、 φ 条件下的计算机仿真投影图像

Fig.5 The computer simulation projected images in different θ and φ conditions

射线与长方体的关系可以分为穿过长方体、没有穿过长方体两种。为了便于分析, 将射线穿过长方体物体分为四大类, 共 15 种情况, 见图 3 所示:

射线穿过两个对面: 上下面, 左右面, 前后面 (共 3 种情况);

射线穿过两个相邻侧面: 前面左面, 前面右面, 后面左面, 后面右面 (共 4 种情况);

射线穿过上顶面和一个侧面: 上面左面, 上面右面, 上面前面, 上面后面 (共 4 种情况);

射线穿过下底面和一个侧面: 下面左面, 下面右面, 下面前面, 下面后面 (共 4 种情况);

射线穿过长方体各个平面的判别方式如下:

(1) $|y'(t_{x_1}) - y_0| \leq b \ \&\& \ |z'(t_{x_1}) - z_0| \leq c$ (射线穿过前侧面)

(2) $|y'(t_{x_2}) - y_0| \leq b \ \&\& \ |z'(t_{x_2}) - z_0| \leq c$ (射线穿过后侧面)

(3) $|x'(t_{y_1}) - x_0| \leq a \ \&\& \ |z'(t_{y_1}) - z_0| \leq c$ (射线穿过右侧面)

(4) $|x'(t_{y_2}) - x_0| \leq a \ \&\& \ |z'(t_{y_2}) - z_0| \leq c$ (射线穿过左侧面)

(5) $|x'(t_{z_1}) - x_0| \leq a \ \&\& \ |y'(t_{z_1}) - y_0| \leq b$ (射线穿过上顶面)

$$(6) \quad |x'(t_2) - x_0| \leq a \ \& \ |y'(t_2) - y_0| \leq b \quad (\text{射线穿过下底面})$$

这样如果上述 (1) 和 (2) 同时成立, 则可以判断射线经过长方体的前、后侧面, 即图 3 (a) 中第三幅图像所示的情况。其余情况以此类推。

根据瓦里安公司 PaxScan® 2 520 V 型探测器技术参数 (探测器大小 1536×1920 , 像素大小 $127 \mu\text{m}$) 设置仿真的参数。以 X 射线源到探测器像素中点的直线模拟 X 射线, $M=1536$ 、 $N=1920$ 。这样, 需要计算 $M \times N$ 条射线与长方体的相交情况。算法流程图如图 4 所示。

模拟 CL 系统的参数为: 源与探测器之间的距离 $\overline{os} = 1240 \text{ mm}$, 转轴中心与探测器之间的距离 $\overline{o's} = 500 \text{ mm}$, 探测器像素大小 0.127 mm , 探测器成像矩阵为 1536×1920 (单位: 像素)。

图 5 为几种 θ (z' 轴旋转角)、 φ (z' 轴与 z 轴之间的夹角) 条件下对 $40 \times 60 \times 20$ (单位: mm) 的长方体的计算机仿真投影图像。

3 实验和仿真的结果与讨论

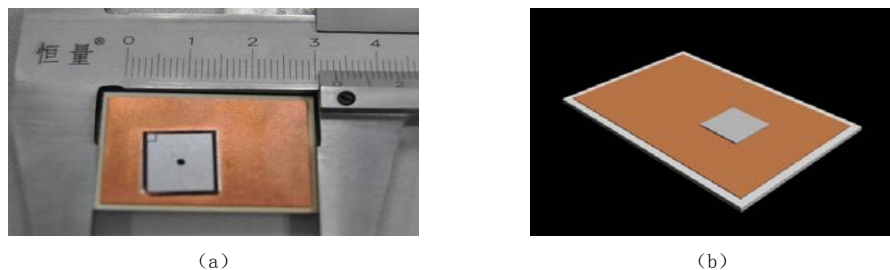
3.1 实验的样品和仿真的模体

依照图 6 (a) 所示的覆铜陶瓷基板 (Direct Bonding Copper, DBC) 上焊接芯片的样品, 建立如图 6 (b) 所示的仿真模体。

仿真模型的几何结构如图 7 所示, 几何数据如表 1 所示。

3.2 实验与仿真结果

图 8 (a) 和 (b) 分别为实验室扫描和计算机仿真得到的投影图。间隔角度 1° , 扫描得

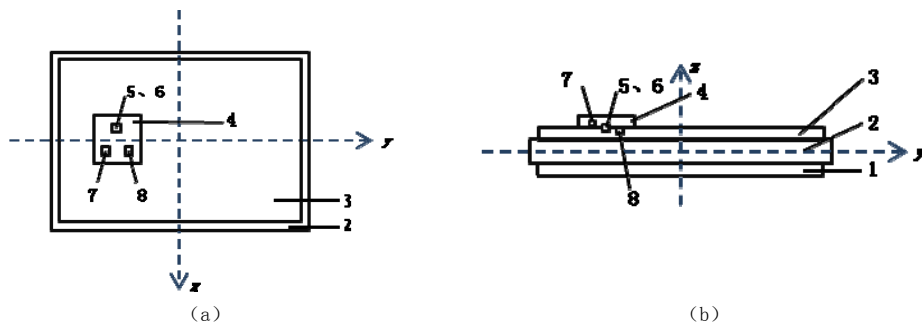


(a)

(b)

图 6 芯片实物及模体

Fig.6 The chip and its phantom



(a)

(b)

图 7 仿真模型的几何结构

Fig.7 The geometric structure of the phantom

到 360 幅投影图, 利用滤波反投影 (Filtered Back Projection, FBP) 算法进行图像重建。

图 9 (a) 是实验室扫描投影图的断层重建图像, 可以清楚看到芯片与 DBC 板之间的气泡。图 9 (b) 是穿过气泡的一条竖直方向的灰度曲线图。可以看到 DBC 板的边缘和芯片的边缘部分都有一个灰度的凸起伪影, 与硬化伪影的“杯状伪影”相似^[12]。

表 1 仿真模型的几何数据
Table 1 The geometric data of the phantom

长方体	中心坐标 x_0/mm	中心坐标 y_0/mm	中心坐标 z_0/mm	x 轴长 /mm	y 轴宽 /mm	z 轴高 /mm	系数
1	0	0	-0.3750	30.0	20.0	0.25	1.00
2	0	0	0	32.0	22.0	0.50	0.20
3	0	0	0.3750	30.0	20.0	0.25	1.00
4	0	-5.0	0.3250	10.0	10.0	0.25	0.50
5	-1.5	-5.0	0.5125	0.1	0.1	0.05	0.01
6	-1.5	-5.0	0.4875	0.1	0.1	0.05	0.01
7	1.5	-6.5	0.5250	0.1	0.1	0.10	0.01
8	1.5	-3.5	0.4750	0.1	0.1	0.10	0.01

图 10 (a) 是仿真投影图的断层重建图像; 图 10 (b) 是仿真芯片部分的放大图, 可以清楚看到仿真的三个气泡; 图 10 (c) 是气泡处的水平方向灰度曲线, 可以看到, 边缘部分也有灰度的凸起。根据仿真的原理, 该伪影不可能是硬化伪影, 因此推断图 9 中边缘灰度高的原因一部分是由“硬化伪影”造成的, 一部分是由“层间混叠”造成的。“层间混叠”伪影与螺旋 CT 中的 z 轴方向的混叠假影^[13]类似, 由于 CL 扫描模式不满足 Nyquist

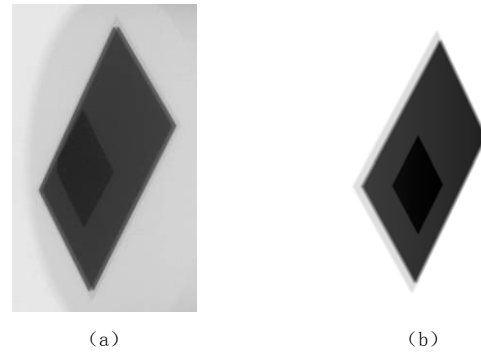
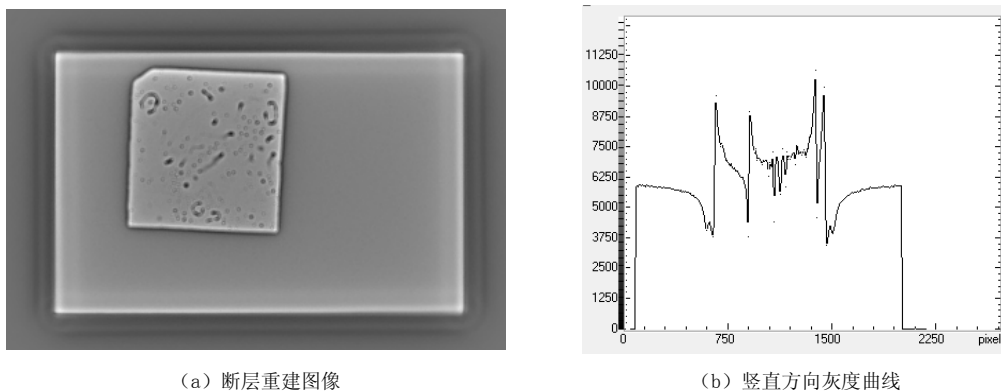


图 8 实验和仿真的投影图

Fig. 8 The projections of experiments and simulations

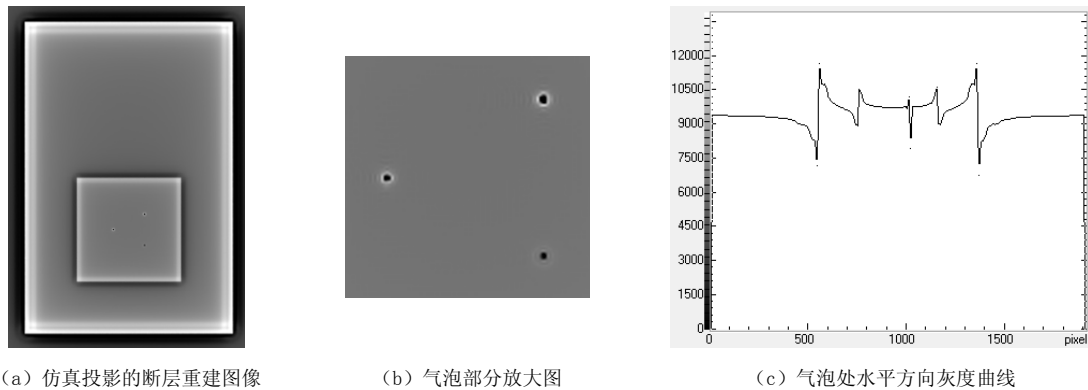


(a) 断层重建图像

(b) 竖直方向灰度曲线

图 9 芯片样品的断层图像

Fig. 9 The tomographic image of the chip



(a) 仿真投影的断层重建图像

(b) 气泡部分放大图

(c) 气泡处水平方向灰度曲线

图 10 芯片模体的断层图像

Fig.10 The tomographic image of the phantom

采样定理^[14], 其 z 轴方向的层间混叠伪影对图像的影响更大。针对 CL 扫描层间混叠伪影方面的研究还不多, 本文为这方面工作的进展提供了一定的研究基础。

3.3 讨论

本研究基于 Matlab 平台, 提出了一种针对长方体构件的投影仿真计算方法, 并且可以根据需要设计不同组合形状、大小的模体, 投影数据正确, 断层重建图像清晰, 与实验结果吻合, 实现了 CL 成像系统的模拟仿真。在此基础上, 可以进一步设置转台位置偏移、倾角、探测器俯仰角、扭摆角等误差, 研究不同误差对重建图像造成何种方式的影响, 不同自由度的误差对成像质量的影响程度如何等。本文对于进一步研究 CL 系统的几何误差对成像质量的影响、改进图像重建算法、分析图像误差来源等都有非常实际的意义。

参考文献

- [1] 隋凤丽, 李国兴, 曲秋华. ICL 板状结构层析扫描装置设计: 研讨会论文集[C]. 全国射线数字成像与 CT 新技术, 2012.
- [2] Fu J, Jiang BH, Li B. Large field of view computed laminography with the asymmetric rotational scanning geometry[J]. Science China, 2010, 53(8): 2261-2271.
- [3] 杨民, 路宏年, 张莉. 分层层析成像中典型构件数字投影计算机仿真[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 180-183. Yang M, Lu HN, Zhang L. Computer simulation of digital projections of typical objects based on computed laminography reconstruction[J]. Acta Armamentar II, 2003, 24(2): 180-183.
- [4] Kak AC, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1988.
- [5] 阙介民. 不完备数据重建算法及 CL 系统研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2012. Que JM. Study of the algorithm for incomplete projection data and computed laminography[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [6] Que JM, Cao DQ, Zhao W, et al. Computed laminography and reconstruction algorithm[J]. Chinese Physics C, 2012, 36(8): 777-783.
- [7] 朱雷鸣, 吴晓平, 李建伟, 等. 直角坐标系的欧拉旋转变换及动力学方程[J]. 海洋测绘, 2010, 30(3): 9-12. Zhu LM, Wu XP, Li JW, et al. The Euler's rotation and dynamic equation of rectangular coordinate system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(3): 9-12.
- [8] 汤少杰, 牟轩沁, 闫浩. 基于医学 X 射线成像物理模型的模体投影仿真计算[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 901-905.

- Tang SJ, Mo XQ, Yan H. Simulation calculation of phantom projections based on physics model of medical X-ray imaging[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 901-905.
- [9] Merbach JM. Simulation of X-ray projections for experimental 3D tomography[R]. Linköping University, Linköping, Sweden: Image Processing Lab, Dept of Electrical Engineering, 1996.
- [10] Yu HY, Zhao SY, Wang G. A differentiable shepp-logan phantom and its applications in exact cone-beam CT[J]. Physics in Medicine and Biology, 2005, 50: 5583-5595.
- [11] Daniel JM, Diego G, Espinosa A, et al. Single X-ray transmission system for bone mineral density determination[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12): 125105.
- [12] Zhao W, Fu GT, Sun CL, et al. Beam hardening correction for a cone-beam CT system and its effect on spatial resolution[J]. Chinese Physics C, 2011, 35(10): 978-985.
- [13] 陈伟, 刘进康, 欧晓光, 等. 16层螺旋CT中混叠假影的分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2006, 26(6): 619-622.
Chen W, Liu JK, Ou XG, et al. Analysis of aliasing artifacts in 16-slice helical CT[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2006, 26(6): 619-622.
- [14] 莫会云, 潘晋孝. 基于像素采样不足的伪迹处理方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2008, 13(2): 129-133.
Mo HY, Pan JX. Anti-alias processing of cone beam CT reconstruction[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2008, 13(2): 129-133.

Computer Simulation of Digital Projections-of-cuboid Object in CL System

WANG Ya-xiao, WEI Cun-feng, QUE Jie-min, SHU Yan-feng, CAO Da-quan,
WANG Yan-fang, SUN Cui-li, SHI Rong-jian, WEI Long[✉]

1. Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. Beijing Engineering Research Center of Radiographic Techniques and Equipment, Beijing 100049, China

Abstract: Computer Simulation of X-ray Projections can be used to exclude the random errors during the X-ray tomography scan. It can be used for verifying the correctness of the scan mode and image reconstruction method, and providing theoretical basis for the actual system implementation and improvement and reconstruction algorithm. While most of the simulation focused on cylinder and ellipsoid, we make simulation of cuboid samples in typical CL system in this paper, as printed circuit is approximate sheet-like cuboid. We compared the Experimental and simulation results and get satisfactory results. The work provides a good foundation for improving image reconstruction algorithm, analyze errors and correct artifacts.

Key words: X-ray inspection; CL system; computer laminography; rectangular projection



作者简介: 王雅霄 (1987—), 女, 目前为中国科学院高能物理研究所硕博生, 主要从事 X 射线成像、CT 成像算法等方面的研究, Tel: 010-88236253, E-mail: wangyaxiao@ihep.ac.cn; 魏龙[✉] (1965—), 男, 高能物理研究所研究员, 研究方向为核方法及其应用, 目前研究内容包括慢正电子技术研究、核成像技术及应用研究等, Tel: 010-88236347, E-mail: weil@ihep.ac.cn.