

X射线面阵列探测器平移扫描分层成像

宋征, 王经瑾, 林勇, 王建国

(清华大学 粒子技术与辐射成像国家专业实验室, 北京 100084)

摘要: 文章介绍一种先进的移动物品高速准三维成像技术, 即利用锥束 X 射线和面阵列探测器平移扫描 (PDTS), 实现移动物品的高速准三维成像。这种成像技术的优点是通过 1 次简单的平移扫描即可获得物体空间的准三维信息。

关键词: 锥束 X 射线; 平移扫描; 分层成像

中图分类号: TL99

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)05-0444-04

X-ray Laminography With Panel Detector Translation Scan

SONG Zheng, WANG Jing-jin, LIN Yong, WANG Jian-guo

(Particle Technology and Radiation Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An advanced fast quasi-3D imaging method for inspecting moving object is presented. Using cone-beam X-ray and panel detector translation scan (PDTS), quasi-3D data of the object structure can be obtained just by one translation scan.

Key words: cone-beam X-ray; translation scan; laminography

扫描式 X 射线货物检查系统和无损检测系统一般采用线阵列探测器平移扫描成像, 这种成像方法获得的图像中物体前后互相重叠, 不易分辨, 且只能获得物体沿 X 射线束方向的投影, 无法判断物体在其他方向上的形状。

用两列相隔一定距离的线阵列探测器对物体进行直线扫描, 获得物体的两个不同视角的投影, 然后利用观看立体照片的方法可观察到立体的图像^[1~3], 但这种立体成像需借助立体眼镜来观察, 容易导致视觉疲劳。彻底的三维成像是 CT 扫描, 但 CT 扫描时间和图像重建时间都慢很多, 且设备庞大昂贵。

本工作采用面阵列探测器取代线阵列探测器对货物或成品进行平移扫描来进行成像。

1 面阵列探测器平移扫描成像原理

面阵列探测器平移扫描 (PDTS, panel detector translation scan) 成像系统示于图 1a。物体经过 1 次平移扫描, 面阵列探测器中的每一列像素均可获得 1 幅物体的二维投影图像。如果探测器具有 N 列 M 行, 1 次平移扫描中获取了 L 次图像, 则可以获得 N 幅 $L \times M$ 的二维投影图像。

同一行的探测器像素在平移扫描时均获取物体同一截面内的投影数据 (图 1b), 在平移扫描时, 同一行像素中的单个像素和源点的连线平行地扫描过物体此截面。因此, 在此物体截面内, 1 次平移扫描可获取 N 个不同方向的平行束一维投影, 投影角范围为射线水平张角 θ 。

收稿日期: 2003-04-25; 修回日期: 2003-09-27

作者简介: 宋征 (1975—), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 核技术与应用专业

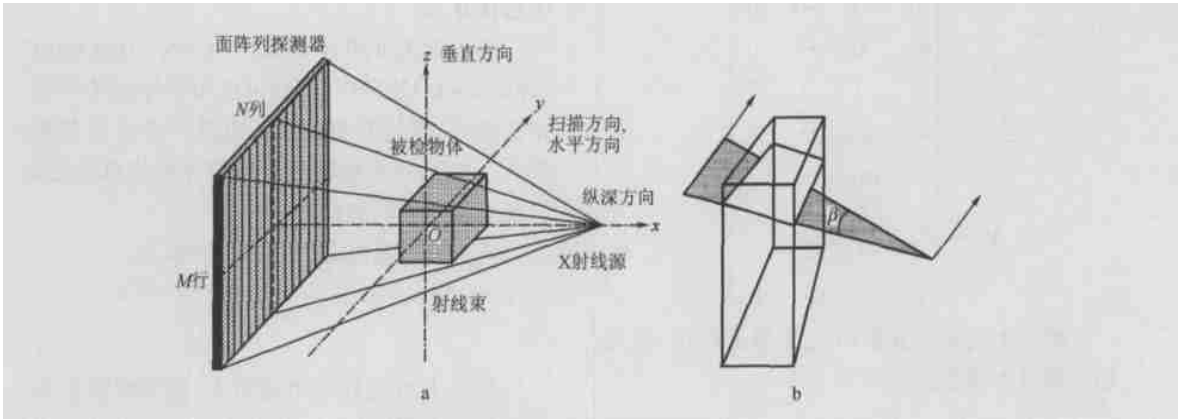


图 1 面阵列平移扫描成像原理图

Fig. 1 Principle of panel detector translation scan

- a——面阵列平移扫描成像系统装置示意图;
- b——平移扫描时同一行探测器像素获取到的截面

利用简单的平行束投影 CT 图像重建算法,可重建此物体截面的图像。

事实上,PDTS 是一种有限角投影 CT,只有射线张角 达到 180 时才是完全投影 CT。实际的面阵列平移扫描系统达不到这样大的射线张角,所以都是有限角投影断层成像,图像质量不如完全投影 CT。

2 面阵列探测器平移扫描成像算法

K. C. Tam 等^[4]通过直接对 Radon 逆变换进行了傅里叶变换,推导出了有限角重建的点扩散函数 (x, y) :

$$(x, y) = \frac{1}{2(\tan \frac{\alpha}{2} y^2 - \frac{x^2}{\tan \frac{\alpha}{2}})} \quad (x, y) \neq (0, 0) \quad (1)$$

式中 x 和 y 的定义示于图 2。

在实际系统中, (x, y) 无法用于逆卷积,因为它在原点无穷大。考虑到像素有一定体积,以体积有限的点(1 个像素的点)获得近似的点扩散函数 (x, y) ,以此作为卷积核来进行反卷积^[3]。

获取到点扩散函数后,将之作为卷积核进行反卷积迭代。本工作采用图像恢复中的高斯-赛德尔(G-S)迭代法。具体迭代过程如下。

因重建的反投影图像是实际物体图像和点扩散图像的卷积:

$$[BPu](r) = u(r) * * u(r) \quad (2)$$

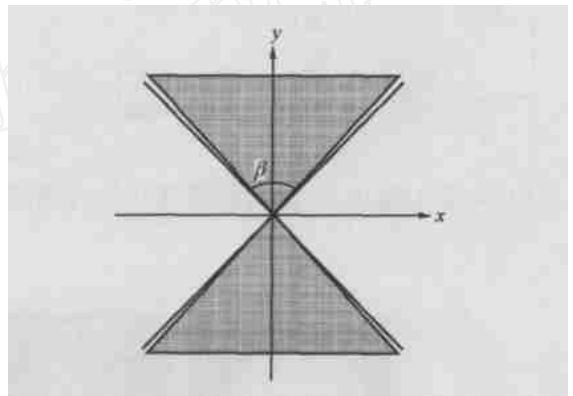


图 2 PDTS 的点响应函数

Fig. 2 Point response function of PDTS

式(2)中的反投影图像 $[BPu](r)$ 通过滤波反投影算法获得,点扩散函数 $u(r)$ 已知,只需求解原图像 $u(r)$ 。将式(2)转化成等价的一维线性方程组,记为:

$$Ax = b \quad (3)$$

其中: x 是图像 $u(r)$ 转化成一维向量; b 是由反投影图像转化成一维向量; A 是点扩散函数 $u(r)$ 转化成的与 x 相对应的非奇异矩阵, A 中矩阵元 a_{ii} 均相等,等于点扩散函数中心点的值,它远大于点扩散函数中的其他值。

将 A 分裂成 $A = D - L - V$, 其中:

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 0 & 0 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

将其中的每一方程用 a_{ii} 去除后移项,得到如下等价方程组:

$$x_i = \frac{1}{a_{ii}} (b_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}x_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中: x_i 是式(3)中向量 x 的向量元; b_i 是式(3)中向量 b 的向量元。

高斯-赛德尔迭代法的公式为:

$$\begin{cases} x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + x_i \\ x_i = \frac{w}{a_{ii}} (b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i}^n a_{ij}x_j^{(k)}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: w 是加速因子, 因需保证迭代的收敛性, 应选择好 w 。

迭代中还可加入 POCS^[4] (projection onto convex sets) 的思想, 即如果已知物体在某一限定范围内, 则计算中超出此范围的点全部直接取 0。这里, 可由物体的外部箱体来加以限定, 只起到加速迭代的作用。

迭代时判断其是否收敛的判据为:

$$P = \max_i |x_i| / \max_i |x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}| \quad (6)$$

如果 P 在迭代中迅速增大, 则表明需重新调节加速因子 w 。

图 3 是迭代的计算机模拟结果。模拟的是一圆中有两个椭圆空洞。投影有限张角为 90°。

图 3 中的曲线图分别是 4 幅图中经过右边椭圆空洞中心的一系列数据所形成的灰度剖面图。各重建图像均有不同程度的畸变和伪影, 但这是由物体的 1 次快速通过获得的断层图像。

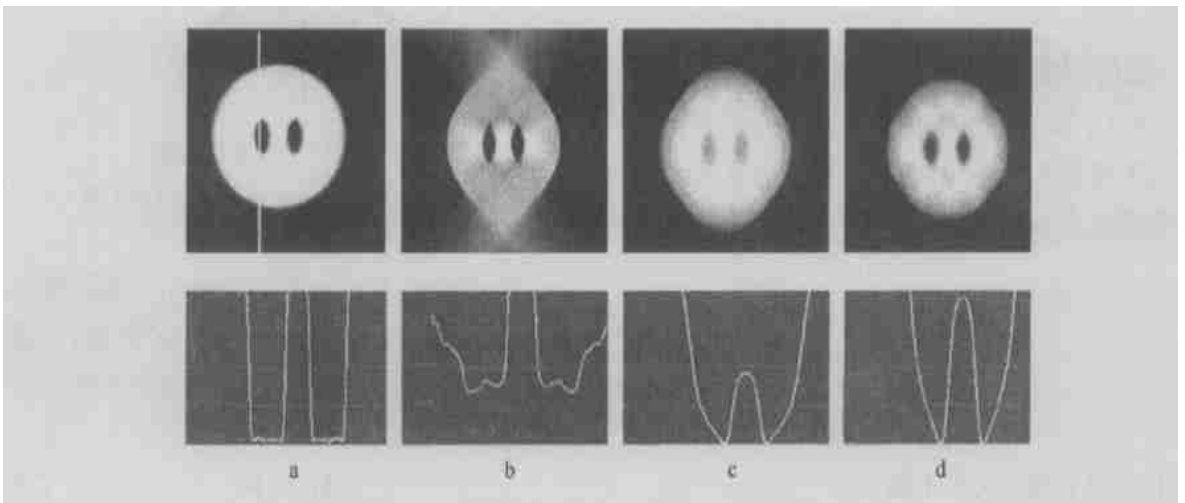


图 3 PDTS 反卷积迭代图像重建的模拟结果

Fig. 3 Simulated PDTS image reconstruction by deconvolution iterating

a——实际物体的断层; b——直接采用滤波反投影算法重建的图像;
c——经过 10 次迭代的结果; d——经过 30 次迭代的结果

3 PDTS 实验结果

本工作开发了一种全新的三维(或准三维)物体图像显示法: 多视角递进分层成像显示法 MASL (multi-view-angle successive laminography)。该方法可对被检测物体进行各个方

向的分层, 层厚可调, 层位置可随意递进。实验中采用的是数字化 X 射线成像探测器^[5]。

图 4 是多层物体的 PDTS 成像结果。图 4 中的被检查物体放置在 3 个储藏盒中, 第 1 个盒中放置的是一示波器的探头以及电缆, 第 2

个盒中放置的是3把小螺丝刀,第3个盒中放置一电路板。图4显示出的分层位置递进图像为:图4a是总体透射图像,3个盒中的物体互相叠加在一起,电路板器件被遮挡,难以区分物体的前后;图4b是分层位置处于最前位置,第1盒中的探头和电缆显得非常清楚,而其他两盒内的物体只有一些虚影存在;图4c是当分层位置往前递进到两盒之间,3个盒内的物体图

像发散模糊;图4d是当分层位置到达在第2个盒时,其中的3个小螺丝刀立刻显示清晰,而其他两个盒的物品变得模糊成为伪影;图4e是当分层位置继续往前递进到两盒之间时的图像;图4f是分层位置到达第3个盒时,电路板清晰地显示出来,虽然仍有其他两层物体的干扰,但电路板的器件完整而清晰。

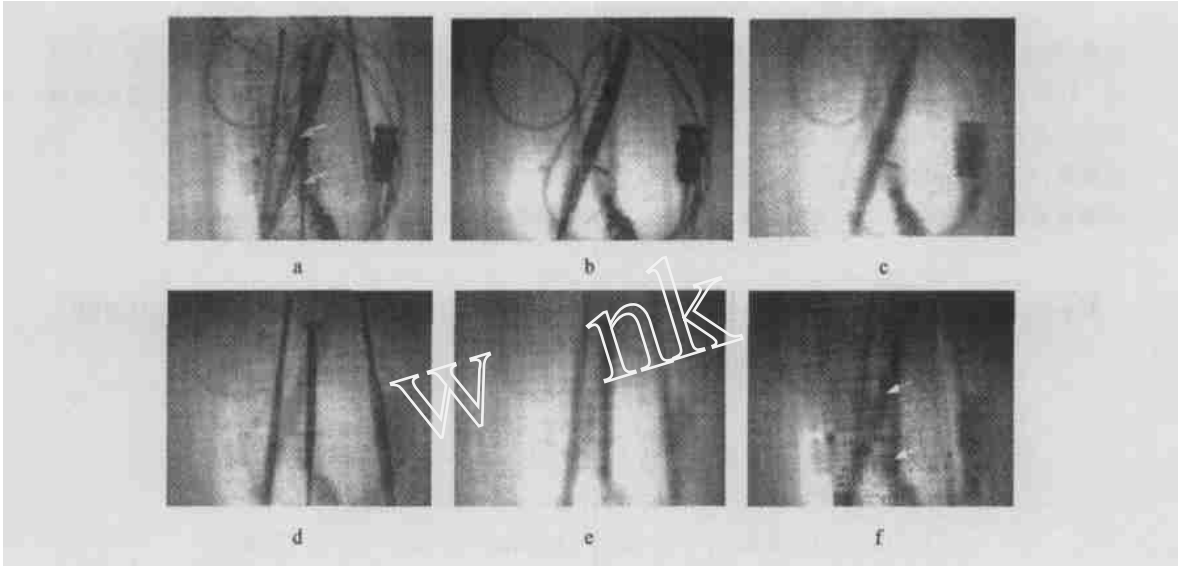


图4 PDTS 实验效果图

Fig. 4 Tested images of PDTS

4 结论

PDTS 成像能在1次平移扫描中获得物体各截面的有限角的平行束投影,可进行各截面图像的快速三维重建,将其组合起来可得到物体任意角度、任意深度、任意分层厚度的分层图像,十分适合对直线传送的物体进行快速三维检测。在射线张角小于 180° 时,这些分层图像均带有一定伪影干扰。但与单个线阵列扫描相比,检测速度同样快、机电系统同样简单,却可获得视觉能识别的物体三维结构。

利用多视角递进分层成像显示法 MASL 还可实现采用单个线阵列探测器扫描所无法实现的不同视角、不同层厚、不同层位置的分层显示效果,显著提高对物体的识别能力。

参考文献:

[1] Evans P, Robinson M, Lacey D, et al. Development of 3D X-ray Systems for Airport Security Ap-

plications[A]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering[C]. [s.l.]:[s.n.],1992~1993.16~17.

[2] Weissman MA. Stereoscopic Imaging via Rotation and Translation[A]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering[C]. [s.l.]:[s.n.],1995.7~8.

[3] MeGlamery BL. Restoration of Turbulence Degraded Images[J]. J Opt Soc Amer,1967,57(3):293~297.

[4] Tam KC, Perez-Mendez V, Macdonald B. Limited Angle 3-D Reconstructions From Continuous and Pinhole Projections[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1980, NS-27:455~458.

[5] 王经瑾,苑杰,刘亚强,等.数字化网络化多通道闪光X射线成像系统[A].第10届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集[C].北京:原子能出版社,2000.2~5.