

利用高精度计算机断层扫描系统 重建青铜器的三维模型

邓阳全 童蕾旭 丁锦频 魏艳艳 刘建云 单颖

(成都华通博物馆中国文物保护技术协会文物保护研究检测基地, 成都 610041)

摘要: 目的: 以香熏为例介绍一种无损获取青铜器三维数据的方法, 为重建其三维模型和研究其制造工艺奠定基础。方法: 利用高精度计算机断层扫描系统通过数字成像 (DR) 和锥束扫描 (CT) 两种方式扫描香熏, 获得其灰度图像, 经过图形图像处理, 获取表面轮廓三维数据; 表面定义和提取后, 将数据输入逆向工程软件系统, 重建香熏的三维CAD模型。结果: 获得的点云数据密集均匀, 未见扫描盲区; 研究发现香熏存在焊孔和变形; 逆向三维重建的香熏CAD模型具有良好的几何相似性。结论: 高精度计算机断层扫描方法空间分辨率高, 精确度高, 可以作为一种获取青铜器三维数据的可靠方法。

关键词: 高精度计算机断层扫描系统 无损分析 三维重建

1. 引言

高精度计算机断层扫描系统 (high resolution computed tomography system), 又称之为工业CT (industrial computed tomography, ICT), 其基本原理是一束薄的扇形射线束 (X射线或 γ 射线) 穿过被检测物体时将要被衰减, 衰减的射线强度与物体的材料组分、密度、尺寸及入射前的能量有关, 这样探测器从不同的角度采集信号, 输入计算机, 用数学重建方法计算出射线切割物体截面吸收系数的点阵, 转换成一幅截面图像。该技术具有非接触、非破坏、无影像重叠、分辨率高等特点, 主要用于工业产品无损检测 (NDT) 和无损评价 (NDE), 被检工件可小到毫米, 大到数米, 已经广泛应用于文物研究保护^[1~4]、航天航空^[5]、核工业^[6]、军事工业^[7]、石油地质^[8]、化工机械^[9]、高分子材料^[10]、反恐与缉毒^[11]等领域。ICT除了可提供工件断层影像信息外, 还可以进行三维模型的重建。本文通过数字成像 (digital radiography, DR) 和锥束扫描 (cone-beam tomography, CT) 两种方式扫描香熏进行研究, 以期利用高精度计算机断层扫描系统平台对青铜器进行三维重建和制造工艺研究工作提供参考和依据。

2. 材料与方法

2.1 材料和设备

2.1.1 材料

馆藏的香熏高约15.5cm，腹径约9.0cm。

本文采用的设备是全球最大、系列最全的工业X射线设备供应商——德国依科视朗公司原装进口的高精度计算机断层扫描系统，包括以下几个部分。

2.1.2 扫描系统

MG452恒电位射线系统，高压范围：20~450 kV；管电流：0~15mA；焦点：0.4mm/1.0mm；循环油冷却，射线管头安装在可双重调整的支架上，便于在工作维护时对管头作精密调整。

2.1.3 探测器系统

高动态范围直线阵列探测器，长度651 mm；节距254 μ m，2604像素；性噪比：8000:1；对比度<0.5%；准直器0.2~5.0 mm；配备冷却系统以保证其可靠性。

2.1.4 工件运动平台

工件运动主体包含基座和垂直柱状支架均由花岗岩制成，保证了在设备寿命周期内最佳的定位精度。平台运动完全由计算机控制，对操作过程中源与探测器的定位、移动及工作台进行操控。

2.1.5 防护系统

“钢-铅-钢”夹板式结构设计的防护机柜重约25t，最大尺寸：4.2m×2.6m×2.7m，可抵御450kV的X射线，安全性能符合国际标准。

2.1.6 YXLON.CT软件

包括操作和控制CT系统以及其外围设备的各种功能。

2.1.7 VGStudio MAX 2.1图形图像处理软件

2.2 数字成像（DR）

实验室装置及香熏放置如图1所示，DR扫描条件：电压400kV，电流1.75mA，焦点0.4mm，扫描高度170mm。将香熏置于扫描区域，检测其正投影图像（图1）。

2.3 锥束扫描 (CT)

CT扫描条件：电压400kV，电流1.75mA，焦点0.4mm，空间分辨率6.48lp/mm，对比度分辨率 $\leq 0.43\%$ 扫描厚度0.25mm，扫描层数642，积分时间80ms，投影数目1440；扫描方法如图2所示，焦点-物体的距离（FOD）233.64mm，物体-探测器的距离（ODD）966.36mm，焦点-探测器的距离（FDD）1200.00mm，放大倍数（ $M=FDD/FOD$ ）5.14，探测器（DL）长度661.50mm，旋转工作台直径（FOV）320mm，旋转速度60%。另为了防止束硬化效果出现，使用1mmAl、1mmCu和0.5mmSn三片滤波片来消除低波谱范围。将香熏置于扫描区域，工作台逆时针旋转，探测器拍取每层不同转角下的模型投影数据，利用这些投影序列，重建出香熏的三维精细灰度图像。

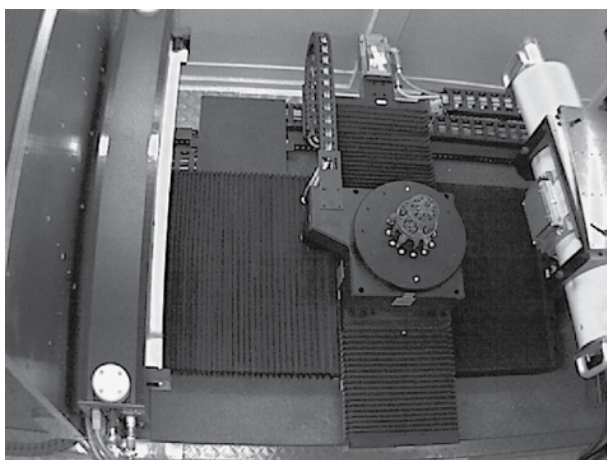


图1 实验装置及香熏放置图

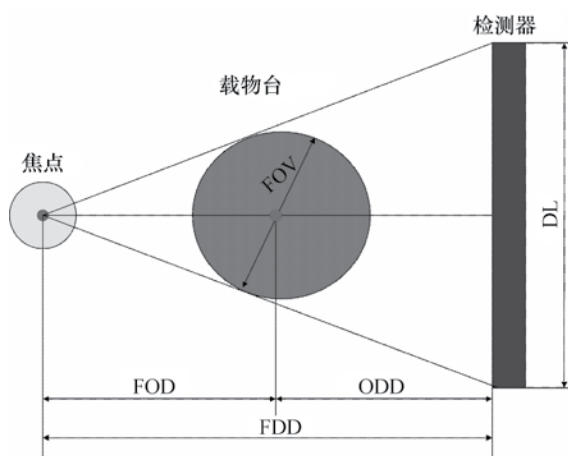


图2 CT扫描示意图

2.4 三维逆向重建

本研究使用大型商务图形图像处理软件VGStudio MAX 2.1，将CT逐层扫描得到的体元数据经过表面定义、表面提取等三维可视化处理后逆向生成三维模型。该软件支持大多数文件的输入/输出格式，使用一般的PC机即可对大容量（香熏扫描数据原始文件为2.0GB）的数据进行双方向处理。利用透明度和明暗度的调节，可以使数据生成各种立体图像，是目前比较主流的形象视觉化软件工具，所使用的算法具有准确性、通用性及灵活性等特点^[12]。

3. 结 果

3.1 数字成像结果

香熏的DR扫描结果如图3所示，这种扫描运动模式所得到的图像与传统X射线照相所得到的图像相同，该图像就是香熏的正投影图像，其影像是重叠在一起的，因此，对缺陷的显示灵敏度低，但从图像上能看出香熏的投影轮廓及大致结构，CT系统上的DR功能主要用于准确地选择CT断层位置。DR扫描还可用于观察文物完残断裂情况，有无被覆盖的纹饰或铭文，反映其相关的结构特征、古代及近代修复痕迹（图4）等。



图3 DR扫描结果示意图



图4 文物修复后的DR扫描图

3.2 锥束扫描结果

香熏的CT扫描结果如图5所示，CT扫描得到的断层图像明显地包含了香熏的形状、孔隙等内部结构信息，内部的同一层同一种方式扫描后往往会具有不同的灰度值，为后续的数字图像处理与三维图像重建提供了可靠的数据与信息基础。此外从图中还可发现香熏的足、环座与主体的连接处有较明亮的焊点，表明该器物并非一次浇铸而成，而是先分铸再通过焊接工艺形成。

3.3 三维模型重建

为了高效、准确地提取香熏的图像轮廓数据，利用VGStudio MAX 2.1软件分别完成了断层图像条状膺像、环形膺像等步骤后将香熏每层扫描原始数据导入形成的三维模型（图6）外形轮廓、纹饰等结构平滑清晰，无数据缺失，在放大的图片上可见点云均匀、密集、完整。

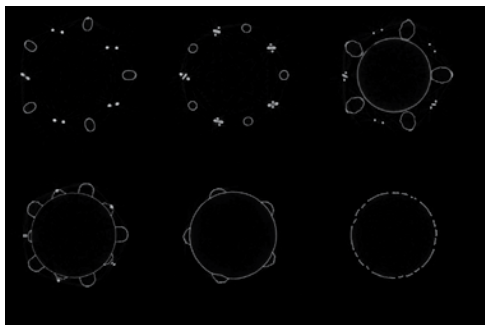


图5 典型的断层图像



图6 香熏的三维模型（右侧为局部放大图）

得到香熏的三维模型以后，需要检查其实际效果，如查看内部的制作工艺、结构分布、材质分布及缺陷等，这可通过对香熏的三维模型任意方向的剖切完成。例如，对其进行纵向的剖切，得到如图7所示的剖面，发现在香熏内部存在环状变形区域，这是由于焊接时冷热不均，受热部位产生拉应力，未受热部位产生压应力形成的^[13]。

对上述三维模型,在VGStudio MAX 2.1软件中进行表面定义、表面提取等处理后,逆向重建香熏的三维CAD模型(图8),与实物具有良好的几何相似性,并可导出各部分精确的尺寸,为文物的保护研究、复制、三维展示及进一步的有限元分析等提供精确可靠的模型支持。



图7 三维模型的剖面展示



图8 逆向得到的CAD模型

4. 结 论

(1) 应用高精度计算机断层扫描系统实现了青铜器断层图像序列的三维重建,并实现了三维模型在任意方向上的实施检查。

(2) 获得的青铜器三维模型点云数据密集均匀、未见扫描盲区。

(3) 在VG软件平台上,实现青铜器CAD模型的逆向重建,该模型结构完整,图像平滑清晰。

5. 展 望

高精度计算机断层扫描技术为文物保护研究的逆向工程设计开辟了新的途径,应用前景十分诱人。工业CT在文物保护中的应用研究在国外不足20年历史,在国内也是近几年的事情,因而这方面的技术优势还没有充分挖掘,为此应开展工业CT在文保工作中的推广应用工作,不断提高应用水平。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Blaas J, Botha C, et al. Process for the 3D virtual reconstruction of a microcultural heritage artifact obtained by synchrotron radiation CT technology using open source and free software. *Journal of cultural heritage*, 2012, 13 (2) : 221-225.
- [2] Capitani D, Tullio V D, Proietti N Nuclear Magnetic Resonance to characterize and monitor cultural heritage. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2012, 64: 29-69.

-
- [3] Morigi M P, Casali F, Bettuzzi M, et al. CT investigation of two paintings on wood tables by Gentile da Fabriano. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 580 (1) : 735-738.
- [4] 马振智, 张健, 杨军昌. 陕西历史博物馆藏古代棘轮的工业CT 检查与分析. 考古与文物, 2004, 3: 90-92.
- [5] 刘荣臻. 固体火箭发动机工业CT检测技术. 战术导弹技术, 2008, 5: 92-96.
- [6] 戴斌, 张伟斌, 田勇, 等. 含能材料损伤裂纹的工业CT图像分析. CT 理论与应用研究, 2009, 18 (4) : 68-74.
- [7] 陈慧能, 杨树彬, 崔卫东. 工业 CT 在火工品逆向工程的应用研究. 火工品, 2006, 3: 36-38.
- [8] 余敏, 寿建峰, 郑兴平, 等. 基于CT 成像的三维高精度储集层表征技术及应用. 新疆石油地质, 2011, 32 (6) : 664-666.
- [9] 卢洪义, 徐明, 于光辉, 等. 基于工业CT 技术的设备故障诊断与维修. 航空动力学报, 2007, 22 (7) : 1030-1034.
- [10] 杨存丰, 李敬明, 田勇, 等. 工业CT 在增强硬质聚氨酯泡沫塑料无损检测中的应用. CT 理论与应用研究, 2009, 18 (3) : 66-71.
- [11] 张道建, 邵立康. 工业CT 在引信部件探伤中的设计及应用. 四川兵工学报, 2012, 33 (1) : 19-21.
- [12] Lee K H, Woo H, Suk T. Data reduction methods for reverse engineering. Internation Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17 (10) : 735 -740.
- [13] 邹莱莲. 焊接理论及工艺基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994: 148-158.