

显微 CT 技术在古生物学中的应用

侯叶茂, 尹鹏飞, 张效梅

(中国科学院 古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

摘要: 古生物学家通过观察研究古生物化石解剖结构来解答生命演化的奥秘。传统解析化石内部的精细解剖结构主要采用经典的连续磨片法。这种方法费时、费力并且会对化石造成永久性损伤。因此, 本文介绍了应用显微 CT 技术结合三维重建方法对化石内部解剖结构进行无损成像的案例。该研究案例主要包括 CT 图像采集、CT 图像去噪、CT 图像分割以及三维建模等方面。这个研究案例有助于显微 CT 技术人员高效获取高信噪比 CT 图像, 提升古生物学家进行化石二维或三维解剖结构信息定性、定量分析的工作效率。

关键词: 古生物学; 连续磨片法; 显微 CT; 深度学习

Applications of micro-CT technology in paleontology

HOU Yemao, YIN Pengfei, ZHANG Xiaomei

(Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China)

Abstract: Paleontologists solve the mysteries of life's evolution by studying the anatomical structures in fossils. Traditionally, the classic serial grinding method has been used to analyze these fine structures. However, this method is time-consuming, labor-intensive, and can cause permanent damage to the fossils. Therefore, this paper introduces a case study applying micro-CT technology combined with 3D reconstruction to non-destructively image the anatomical structures in fossils. This case study mainly involves CT image acquisition, CT image denoising, CT image segmentation, and 3D modeling. It will assist micro-CT technicians in efficiently obtaining high signal-to-noise ratio CT images, enabling paleontologists to perform more effective qualitative and quantitative analyses of 2D and 3D anatomical structure information.

Keywords: Paleontology; Serial grinding method; Micro-CT; Deep learning

1 引言

古生物学是研究古地质时期生物及其发展的科学^[1]。古生物学家通过对化石的观察, 配

合对含化石岩层的了解以及其他一些有关地质问题的研究，以解释古代生物中的各类问题。传统古生物的研究方法主要是通过肉眼、放大镜、光学显微镜、电子显微镜等观察研究古生物化石外表的宏观和微观结构；或者通过经典的连续磨片法解析古生物化石内部的精细解剖结构。连续磨片法是由英国地质学家和人类学家威廉·约翰逊·索拉斯发明的，简单地说，就是将化石一层层磨掉（每层磨去几十微米），磨去一层进行一次拍照，并根据放大的投影描绘化石暴露断面的内外部骨骼结构；然后把融化的蜡倒在素描图上压成蜡质薄片，并按照素描图中的断面结构进行细致的切割；最后按顺序将蜡质薄片一层层叠摺起来，制成化石的完整蜡质模型^[2]。其中，中国科学院古脊椎所张弥曼院士对杨氏鱼的吻部进行精细的研究工作就采用了当时比较先进的连续磨片法。张弥曼院士通过连续磨片发现了杨氏鱼的口腔并没有内鼻孔，进而改写了人们对于四足动物起源的认知。杨氏鱼化石标本的直径大约 2.8cm，张弥曼院士用了将近 2 年的时间，将其研磨出 540 层间距为 50 微米左右的断面并绘制了素描图，进而完成了杨氏鱼蜡质模型的制作及其内部解剖结构的三维复原工作。然而，古生物学家也意识到连续磨片法虽然可以复原化石内部的精细解剖结构信息，但是这是一种对于化石会造成永久损伤和无法复现的研究方式，同时需要耗费大量的时间和精力。因此，从上世纪八十年代后期到本世纪初，在没有更新迭代出更有效的研究方法之前，古生物学家对于古生物化石，特别是早期脊椎动物化石脑颅解剖结构的研究，处于一个相对缓慢的发展阶段。

2 显微 CT 成像技术

近年来，古生物学家开始广泛应用 X 射线计算机断层成像（X-CT）技术无损探究化石内部解剖结构^[3]。X-CT 技术可以无损地获取化石图像信息，在空间分辨率和密度分辨率方面接近或者超过了连续磨片法，并且这种技术手段更加方便、快捷，节省了大量的人力、物力。我国古生物学家也较早的将显微 CT 技术应用到了古生物化石研究中，特别是早期脊椎动物化石标本研究，例如初始全颌鱼、麒麟鱼、阜康鱼、蠕纹沈氏棘鱼、奇迹秀山鱼等。下文将详细介绍古生物学家如何利用显微 CT 成像技术无损的完成古生物化石研究工作的。

2.1 CT 图像获取

本文案例采用的仪器设备是由中国科学院古脊椎所、高能物理所以及自动化所联合研制的国内首台专门应用于化石无损检测的显微 CT 扫描仪。仪器设备的名称是 225kV 显微工业 CT，仪器型号为 225kV- μ CT，各向同性体素尺寸可以达到 5 μ m，相对密度分辨率可以达到 1‰，扫描化石直径可以达到 100mm^[4]，如图 1 所示为 225kV 显微工业 CT 实物图。

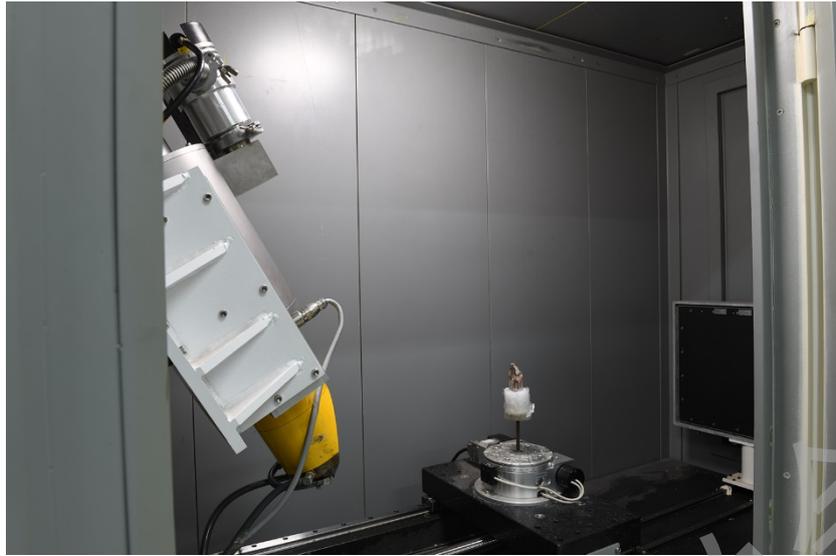


图1 225kV 显微工业 CT 实物图

显微 CT 扫描仪主要由四个关键部件组成：X 射线源、高精度转台、X 射线探测器（ 2048×1536 像素）以及计算机控制系统。X 射线源的阴极发射电子，经阴极、阳极间的电场加速，高速运动的电子轰击 X 射线管靶（Target），将其动能传递给靶上的原子。其中约有 1% 左右的能量可以转化为 X 射线，并从 X 射线照射窗（Output Window）中射出，进而产生锥形的 X 射线束。锥形的 X 射线束聚焦到放置在高精度转台上的化石样本，同时高精度转台进行 360° 步进式旋转。在旋转的过程中，X 射线探测器以小角度通常为 0.1° 到 0.05° 范围的间隔连续拍摄一系列 X 射线投影图。角度间隔越小，采集的投影图数量越多，进而可以减轻 CT 图像中条状伪影的出现，通常 X 射线投影图数量为探测器横向探元数的 1.5 倍成像效果较为理想。X 射线投影图可以反映出 X 射线在化石中的能量衰减程度（由化石的岩性和形状决定）。为了产生高对比度和高亮度的 CT 图像，X 射线束需要充分穿透化石样品同时又不能超出探测器端的测量范围。因此，我们必须仔细选择最适合化石样品的 X 射线能量（由电压和电流决定）。如果 X 射线束的能量过高会造成 CT 图像出现射束硬化伪影，这时我们需要引入不同厚度和材质的滤波片滤掉 X 射线中的低能部分减轻射束硬化的产生。本文以扫描直径为 2.5cm 的岩样为案例，我们需要设置 X 射线源的电压为 140kV，电流为 $120\mu\text{A}$ ，引入厚度为 0.1 毫米铜片有效的减轻射束硬化伪影。最后，计算机控制系统应用 GPU 加速滤波反投影算法^[5]，滤波器设置为 hamming 函数，将采集的多角度 X 射线投影图转化为 1,536 张（探测器纵向探元数） 2048×2048 像素（探测器横向探元数）的 CT 断层图，如图 2 所示为显微 CT 扫描过程的示意图。

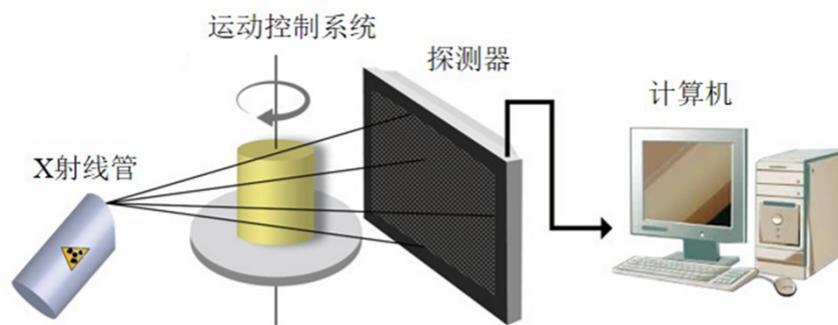


图 2 225KV 显微 CT 扫描过程示意图

2.2 CT 图像去噪

显微 CT 扫描仪采集 CT 图像信噪比的高低会受到诸多硬件因素的影响。由于 X 射线源的不同、探测器内电子线路的不一致等因素，均会导致平板探测器上的不同探元在吸收同样 X 射线能量的前提下，输出不同的反馈信号^[6]。同样显微 CT 扫描仪采集的化石 CT 图像通常也会出现各种噪声，影响后续化石 CT 图像分割的效率。因此，古生物学家在进行后续的 CT 图像分割工作之前，需要先对化石 CT 图像进行去噪处理。一般 CT 图像去噪方法可以分为传统方法和深度学习方法，传统方法应用例如高斯滤波、中值滤波、均值滤波等滤波器，深度学习应用例如 DnCNN、RED-CNN 等网络模型^[7]。由于大多数古生物化石周围均包裹着致密的围岩，通过显微 CT 扫描仪较难获取高信噪比的化石 CT 图像。本文推荐一种基于无监督学习深度学习 CT 图像去噪方法，即 Noise2Noise 网络模型^[8]。Noise2Noise 网络模型是基于 UNet 架构建立，主要包括编码器、解码器以及跳跃连接三部分组成。首先，应用包含不同水平噪声的 CT 图像对、UNet 架构以及 L2 损失函数训练 Noise2Noise 网络模型。然后，将化石 CT 图像直接输入到保存优化权重系数的 Noise2Noise 网络模型中，进而输出具有高信噪比的化石 CT 图像，实现化石 CT 图像的去噪，如图 3 所示为化石 CT 图像去噪前后的效果图。

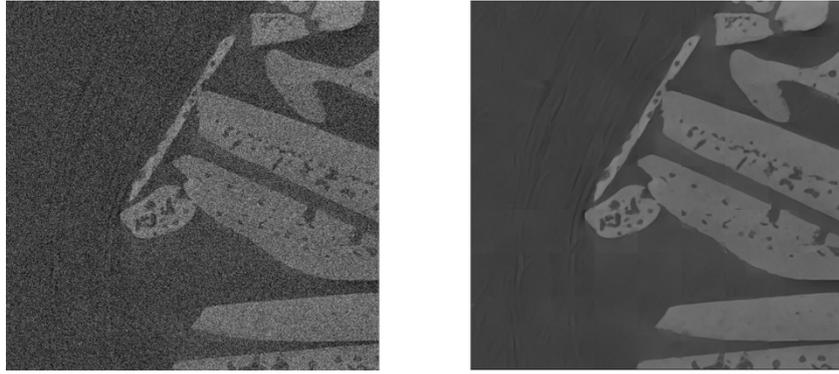


图3 采用 Noise2Noise 网络模型去噪前后的微体化石 CT 图像

去噪前 CT 图像（左图）；去噪后 CT 图像（右图）

2.3 CT 图像分割

古生物学家如果想要进一步对古生物化石进行定性、定量分析以及三维可视化工作，他们需要将化石从其包裹的围岩中分割出来或者将化石的不同解剖结构分割开来，即提取感兴趣区域（Regions of interest, ROIs）。古生物学家提取化石感兴趣区域也是对化石 CT 图像进行图像分割的过程。本文将介绍一种化石 CT 图像分割方法可以将化石与围岩或者化石的不同解剖结构区分开，并划分成不同的感兴趣区域。首先，使用大津法确认化石 CT 图像前景和背景的内方差，根据遍历类内方差的最大值确定 CT 图像最佳阈值，将化石 CT 图像二值化阈值分割成两类（化石和围岩）。当整体 CT 图像的灰度分布直方图呈双峰时，最佳阈值应落在双峰之间波谷位置^[9]。然后，采用图像形态学运算方法，通过腐蚀、膨胀等运算去除化石 CT 图像中外部小颗粒以及内部小间隙，保留化石 CT 图像中的主要结构（化石）。最后，运用区域生长算法，通过选取种子点合并属性相似的相邻像素，并结合手动圈选方式将具有相似性质的像素集合起来构成语义区域，实现化石 CT 图像的半自动语义分割，如图 4 所示为本文案例微体化石 CT 图像分割的效果，图像中不同的颜色代表不同种类的微体化石。



图4 微体化石 CT 图像分割

去噪后的 CT 图像（左图）；二值化的 CT 图像（中图）；分割后的 CT 图像（右图）

2.4 三维建模

古生物学家获取到化石 CT 图像中二维感兴趣区域，便可以进一步进行三维图形处理以及应用，例如功能形态学分析、有限元分析以及流体力学分析等。本文介绍一种应用于步进立方体的化石 CT 图像表面体绘制方法，可以将化石 CT 图像语义分割结果进行等值面提取和表面体绘制渲染，生成化石 CT 图像的等阈值三角面片模型。步进立方体算法是最常用的表面体绘制方法之一，通过寻找在三维体数据中与等值面相交的体素，应用线性插值方式求解等值面与相交体素边的交点，最终连接所有交点提取等值面，生成 CT 图像的等阈值三角面片模型^[10]。步进立方体算法可以将化石 CT 图像堆栈中具有相同灰度阈值的体素抽取出来，以拓扑形式连接成化石三角面片，输出的化石三维模型文件，通常为 STL、OBJ、PLY 等文件格式。应用跨平台工具 Blender 对化石三维模型进行模型优化、提升渲染质量和可视化效果。化石三维模型是由包含有颜色和测量值信息的体素构成，三维模型的外观可以进行任意改变（例如颜色、透明度等），并且可以用于三维数据可视化的研究工作，如图 5 所示本方案例微体化石三维模型可视化结果。

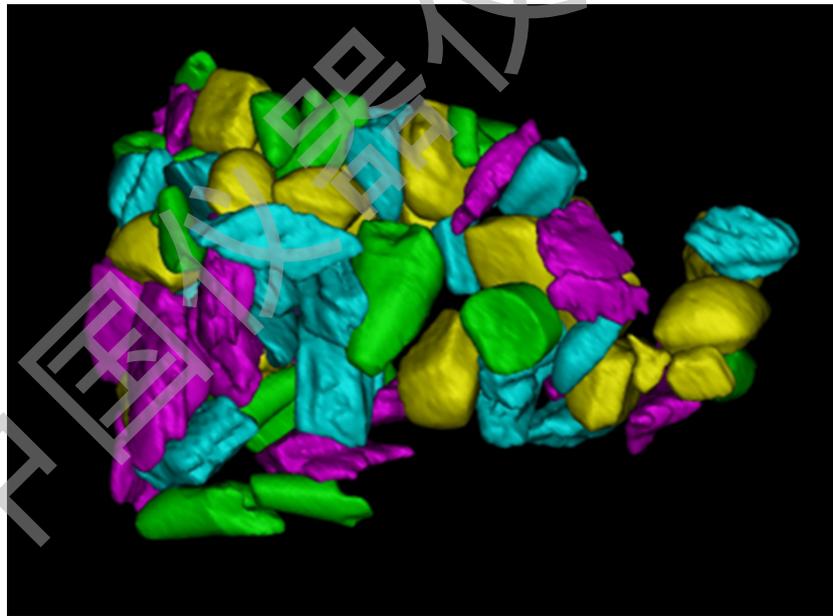


图 5 微体化石三维模型可视化效果图

3 结论

本文以中国科学院古脊椎所、高能物理所以及自动化所联合研制的国内首台专门应用于古生物化石无损检测的显微 CT 扫描仪为例，介绍了仪器设备的研发背景和古生物化石 CT

数据采集、图像去噪、图像分割以及三维建模可视化等工作。具体展开讲述了显微 CT 扫描参数的选取,进而获取高对比度和高亮度的古生物化石 CT 图像。应用基于无监督学习的化石 CT 图像去噪方法,降低化石 CT 图像中的噪声,提升化石 CT 图像的信噪比。古生物学家通过观察去噪后的化石 CT 图像,更加容易辨别化石与围岩之间的界限或者化石的不同解剖结构之间的位置关系,提高了化石 CT 图像分割效率。通过半自动的化石 CT 图像分割以及三维建模工作,获取二维或三维感兴趣区域图像信息,可以为古生物学家后期进行定量、定性的功能形态学、有限元分析、流体力学分析等提供重要的数据支撑。

参考文献:

- [1] Behrensmeier A K, Kidwell S M, Gastaldo R A. Taphonomy and paleobiology[J]. *Paleobiology*, 2000, 26(4): 103-147.
- [2] Sollas W J, A method for the investigation of fossils by serial sections[J], *Philos. Trans. R. Soc., B*, 1904, 196: 259-265.
- [3] Sutton M, Rahman I, Garwood R, Virtual Paleontology—an Overview[J], *Paleontological Society Papers*, 2017, 22: 1-20.
- [4] Wang Y F, Wei C F, Que J M, *et al.* Development and applications of paleontological computed tomography[J], *Vertebrata Palasiatica*, 2019, 57(1): 84-92.
- [5] Turbell H. Cone-beam reconstruction using filtered backprojection[M]. Sweden: Linköping University Electronic Press, 2001: 35-41.
- [6] 唐杰,张丽,高文焕. 基于平板探测器的锥束 CT 系统综述[J], *中国体视学与图像分析*, 2004, 9(2): 65-70.
- [7] Diwakar M, Kumar M, A review on CT image noise and its denoising[J], *Biomedical signal processing control*, 2018, 42: 73-88.
- [8] Lehtinen J, Munkberg J, Hasselgren J, *et al.* Noise2Noise: Learning image restoration without clean data[J], *arXiv preprint*, 2018: 04189.
- [9] Xu X, Xu S, Jin L, *et al.* Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications[J]. *Pattern recognition letters*, 2011, 32(7): 956-961.
- [10] Newman T S, Yi H, A survey of the marching cubes algorithm[J], *Computers Graphics*, 2006, 30(5): 854-879.