

化石头骨虚拟 3D 图像的复原与矫正*

董 为^{1,2} 刘金毅¹ Marc Jaeger³ 朱奇志⁴ 杜湘珂⁴

(1 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044;

2 中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室, 北京 100080;

3 中国科学院自动化研究所中法联合实验室, 北京 100080;

4 北京大学人民医院放射科, 北京 100044)

摘 要 对化石标本的内部进行形态学研究往往需要对本体进行实体解剖。然而对于珍稀化石标本来说不允许任何对化石有创伤的解剖。X 射线透视可以使人们可以对化石内部进行无创观察, 但对于厚度较大, 层次较多的标本, 往往会因投影在荧光屏上的重影而影响图像的观察质量。计算机断层扫描成像(CT)技术的发明使得人们能够克服 X 射线透视的不足, 得到清晰的断层扫描影像。计算机图像处理技术的发展又使人们可以将一系列断层扫描影像复原成虚拟三维立体图像。将这些技术应用到古生物学中便能使人们可以将原先缺损变形的珍稀标本进行虚拟复原矫正、进行任意的虚拟无创解剖, 并根据虚拟复原矫正的图形刻制加工出复原矫正的实物模型, 因此有很大的应用前景。

主题词 CT 影像 3D 虚拟重建 无创解剖 复原 矫正

1 引言

研究生物进化的一种非常重要的途径, 就是对出土的人类与动物化石进行解剖学分析。对于标本数量较多的化石种类来说, 完全可以通过机械切片的方式把标本内部的形态显露出来。但是对于很多非常珍贵且罕见的化石标本来说, 在研究这些化石时不允许对化石进行实体解剖工作, 而只能从外表进行形态学研究。因此, 对这些化石的研究只能停留在表面形态上, 无法进行内部形态的研究。因此古生物学家们一直希望能找到一些方法, 在不对标本造成创伤的前提下观察珍稀化石的内部形态。

最早用于观察古生物化石内部形态的方法是使用 X 光透视并拍 X 光片。但对于厚度较大, 层次较多的标本使用 X 光透视存在影像的重影问题。1963 年至 1964 年, 南非放射医学专家 Allan Cormack 首次提出了放射断层计算成像的理论。英国医疗器械工程师 Godfrey Hounsfield 于 1968 年设计了放射断层计算成像系统(Computed Tomography), 简称 CT, 并于 1972 年对第 1 位患有脑颅疾病的病人拍摄了脑颅的 CT 图片, 消除了 X 光透视中的重影。使得人类开始无需打开颅腔便能确定脑颅病灶的位置。此后, CT 仪器得

* 中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室开放基金资助 (课题编号 KF203201)
董为: 男, 46 岁, 模式识别国家重点实验室客座研究员, 最近研究化石标本的虚拟 3D 复原

到了不断的改进，图像清晰度不断提高，并被大量应用于医学上那些必须深入到人体内部的诊断。Cormack^[1]因提出CT理论、Hounsfield^[2]因发明CT仪器而分享了1979年诺贝尔医学与生理学奖。由于CT的成像质量依赖于计算机的容量、运算速率及软件的功能，所以随着计算机容量的不断增加、运算速率的不断提高和软件功能的不断增强而日趋完善。至2000年，精度高的CT仪已经可以进行最小间距为0.1 mm的扫描，扫描数据经过计算处理可以将被扫描的物体在显示器上复原成可按任意方向和角度旋转的三维图像，并可对这些图像进行沿任意方向的切割分离，从而无需打开被扫描物体便可以在显示器上对之进行由表及里的观察研究。CT技术的发展，使得古生物学家和古人类学家能够对那些不允许解剖的珍稀化石进行内部形态的研究。1980年以来，人们开始尝试对古人类头骨和脊椎动物头骨化石进行CT扫描成像的研究，但是由于当时计算机容量、运算速率及软件等方面的局限，所获得的3D图形清晰度较低，无法满足研究的需要。随着计算机技术的发展，在过去10年里3D图形的清晰度和可加工性大大提高，因而能够深入到古生物学领域。对古人类头骨的3D图形重建和复原取得较大的成功^[3]，这一突破使得人们可以对珍贵的化石内部形态进行虚拟解剖学和形态功能学研究，并在一些珍贵的古人类头骨^[4-6]和恐龙头骨^[7, 8]化石上进行了尝试并获得成功。这一技术的应用给古生物学注入了新的活力，并成为人们探索的一个新内容。

2 原理

2.1 从 X 射线透视到 CT 扫描成像

每当一个被激活的电子以高速撞击一个原子时，便有 X 射线产生。X 射线与可见光及红外线和紫外线一样是电磁波，但其波长比紫外线还要短得多($10^{-8}\sim 10^{-10}\text{cm}$ 之间或 $110^{-10}\text{m}\sim 0.01\times 10^{-10}\text{m}$ ，而最短的紫外线波长在 $40\times 10^{-8}\text{m}\sim 1\times 10^{-8}\text{m}$)，所以 X 射线可以透过分子间距等于或大于 X 光波长的物体。虽然我们的肉眼看不到 X 光，但这种光可以使感光胶片感光，使荧光屏发出可见光。因此人们应用 X 光的这种特性对物体做无创透视检查。

1968 年 Hounsfield 从事利用计算机重建物体几何形态的研究。他将所研究的物体分解成一系列很小的正方形，以使人们可以计算当一小束 X 射线穿过物体时衰减量的平均值。这项研究成功后，于 1971 年人们得到了第一批 EMI 扫描的脑切面图。为了表彰 Hounsfield 在这一领域所作出的原创性和基础性贡献，诺贝尔基金会于 1979 年将诺贝尔医学与生理学奖授予 Hounsfield。

扫描成像与普通 X 光透视成像或拍片有一定区别。后者所成的图像往往是 X 光在穿过被透视物体后投影在荧光屏或底片上的一系列互有叠覆的影像的组合。而扫描所成的图像是 X 光在环绕被扫描物体以不同角度从一个切面穿过该物体后被该物体吸收强弱的点阵分布图，是数码切面（或称为断层）图像。

CT 扫描系统由一个 X 射线源和一个射线探测器组成，它们在扫描时沿被扫描物体的轴心旋转。射线在通过被扫描物体时会因物体组成的不同而有程度不等的衰减，所以探测器所接收到的信号也是随物体组成不同而变化的。这些信号经计算机处理后，便可显示在屏幕上成为没有重影的断层扫描影像^[8-10]。

2.2 CT 扫描系统的种类

2.2.1 间断旋转

扫描数据在某一位置获得后整个探测管旋转若干角度停下进行新的扫描, 获得一组新的数据后又旋转一个角度, 直到取到所需组数的数据为止。扫描旋转可在 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 间, 所需时间在 20~40 s 间。这种方法仅限于扫描头颅, 普及面很小。

2.2.2 旋转管和探测器

这种方法射线头与探测器在扫描时连续旋转, 没有任何间断。旋转角度在 $220^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 间。扫描时间在 1~10 s 之间。探测器由 300~1 000 个射线感受器组成。这种方法由于价格性能比最好而普及面最大。

2.2.3 射线管单旋转型

这种类型的扫描器射线探测器沿扫描室一周排列, 由 800~2 000 个射线感受器组成, 因此探测器不用旋转, 只要射线源旋转就行了。这种类型精密度较高。由于所需的射线感受器较多, 因而造价较高, 普及面有限。

2.2.4 “电子炮”型 X 射线管

这种类型的仪器使用电子炮轰击沿被扫描物体周围较大的半圆形排列的阳极, 射线探测器安置在阳极的对面。扫描通过轰击阳极的电子束的位移进行。由于这种方法取消了机械位移, 所以所需的时间很短, 只要 100 μs 。这种扫描器多用于对活动性物体(如循环系统)进行扫描, 其造价很高。

2.3 存在的问题

由于扫描、成像、图像处理这一系列过程需要相应的设备和软件, 所以不同的 CT 仪器生产厂家出于保护主义, 各自生产的仪器必须使用同一厂家的相关设备才能解读处理的图像, 而各厂家产品间的兼容性很差。另外, CT 扫描所成图像为物体对射线吸收与反射强弱的反映, 所以当有些不同物体对 X 光的吸收率相近或相同时, 在扫描图像上就无法区分。如水和血, 肝和脂肪, 它们在扫描图像上很难区分。因此需要获得含水器官的图像, 必须使用另一种技术——核磁共振成像, 这项技术的发明获得了 2003 年诺贝尔医学与生理学奖。

3 CT 扫描成像在古生物学中的应用

由于古生物学与古人类学与解剖学关系密切, 国际上有些古生物学和古人类学的研究机构就设在医学院, 所以医学上的新技术马上会被应用于古生物学与古人类学。如 X 光透视就被用来观察被围岩包裹的化石, 观察牙床中尚未萌出的牙齿的发育状况。CT 技术发明后, 马上就被用来如观察被围岩充填的化石, 分析古人类头骨的结构, 比较多瘤齿兽内耳的解剖形态, 无创测量头骨中神经血管的通道与牙齿的珐琅质厚度等无法用常规方法进行的工作^[11~15]。由于 CT 技术发明初期的计算机容量和速率及相关的软件都有较大的局限性, 所以这一技术在早期的应用中主要是通过对标本某一切面影像, 或断层扫描影像进行观察(图 1、图 2)。

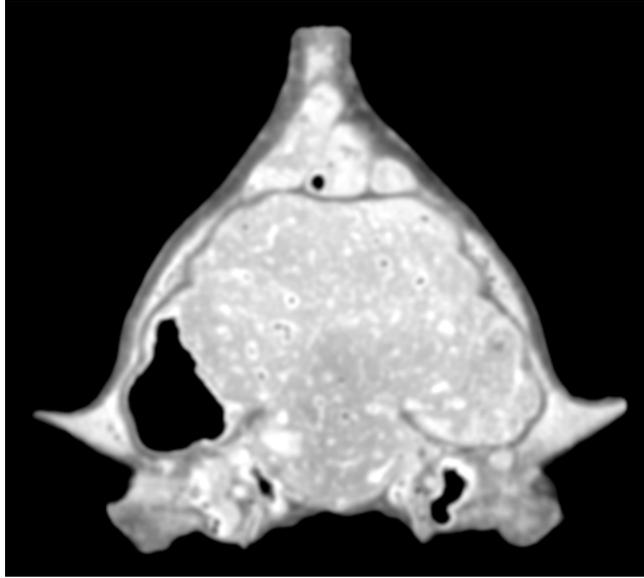


图1 熊猫化石头骨颅区的CT断层扫描影像

Fig. 1 A slice of CT image of cranium of a fossil panda

影像上方两侧可见脑颅的骨壁，下方两侧可见外耳道和骨泡，颅腔内的大部分空间有充填物

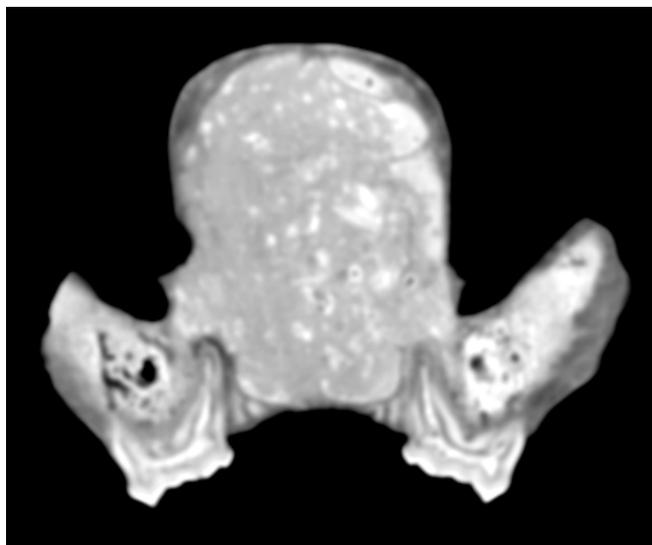


图2 熊猫化石头骨鼻颌区的CT断层扫描影像

Fig. 2 A slice of CT image of nasal-maxillia of a fossil panda

影像的两侧是颧弓，上方是鼻区，下方两侧是上颌骨及上白齿（可见齿根和髓腔）

由于 CT 扫描所获得的图像是一系列单独的二维图像，研究者只能通过这些图像的组合去想象物体的立体形态。随着计算机技术的发展，人们逐渐实现了由计算机替代人脑想象的工作，通过计算机对 CT 扫描图像的微积分计算，可以将一系列平行的断层扫描影像组合成三维立体图像，在屏幕上显示出三维图像，并可根据观察者的需要将三维图像进行旋转，随时将想要观察的部分朝向观察者，并将这一三维图像进行任意方向的旋转，切取任意方向的虚拟断层影像进行观察研究^[3, 4, 6, 7, 16, 17]。

由于化石在埋藏保存中会经历一些外界的扰动，所以大多数化石在出土时或是不完整的，或是受到地质动力的作用发生变形而使原有形态有不同程度的失真。因此，除了将 CT 扫描影像复原成虚拟三维图像以供形态学研究外，人们还探索如何利用已获得的资料信息将破损变形的化石标本进行形态复原和矫正。

如同平面图可以裁剪拼补一样，计算机三维图像也可以裁剪拼补，只是程序更复杂，难度更大，对计算机的容量、运算速率以及软件的功能要求更高。对破损变形化石标本的虚拟三维图像进行复原矫正的技术流程如图 3 所示。

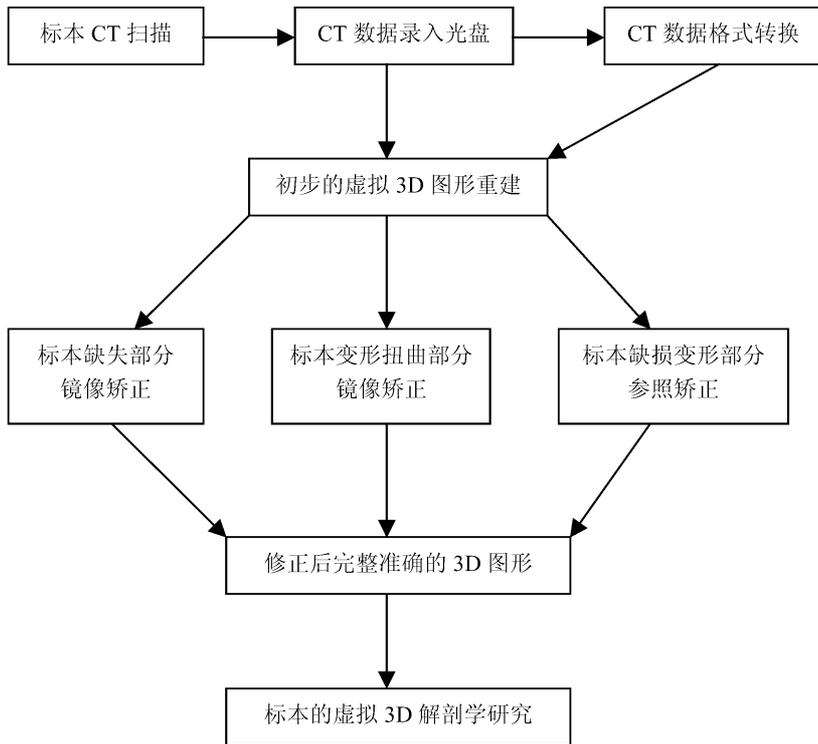


图 3 化石标本虚拟三维影像复原和矫正流程

Fig. 3 Main steps of reconstruction and remedy of 3D images of fossils

标本缺失部分的复原和变形部分的矫正主要是通过参考未缺失变形部分的图像。例如，有件标本的左侧保存较好而右侧有破损变形，那么就先定义剪切左侧未缺失变形部分的图像，然后将之镜像映射到右侧缺失或变形的部位上替代原来缺失或变形的

部分；对于两侧对应部分都缺失或变形的部分，则要通过参考其他未变形的标本，在电脑上“手工绘制”缺失或矫正变形的轮廓，然后用相关的工具复原。经过这一方法处理出来的3D图形便可以用来进行虚拟解剖，做形态学研究了。

经过复原矫正的标本三维图像可以方便地用来进行形态学研究，但有时为了研究标本上的某一部分，如脑内模、内耳、颌窦等^[4, 13, 17]，还需要对复原的三维图形进行进一步加工，将所需要的部分分离出来（图4）。分离出来的部分不仅更加直观，而且体积有所减少，所占容量相应减少，所以在计算机上运行起来更加快捷。

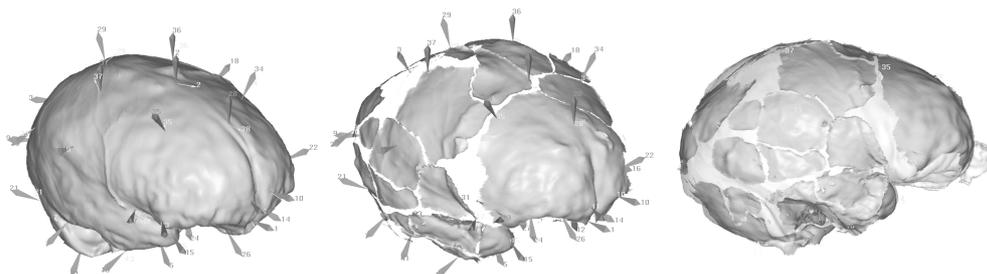


图4 重建的虚拟古人类脑内模（中、右）与现代人脑内模（左）的比较^[4]

Fig. 4 Reconstructed virtual endocast of fossil human with comparison of that of modern human^[4]

除了可以在计算机上对虚拟三维化石图像进行复原、矫正、解剖外，还可以把复原矫正及虚拟解剖出的三维图像作为蓝图，通过计算机控制的立体刻印机在相关材料制成的坯料上刻制出相关的标本模型^[3, 18-20]。用这种方法复制标本模型不仅能无创复制出标本内部通常看不到的器官，而且可以大大减少在常规复制标本模型时对标本翻模可能造成标本损伤的可能。因此，化石标本的CT扫描影像三维复原技术有很广阔的应用前景。

致谢 笔者感谢中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室资助本研究并提供相关条件。中国科学院自动化研究所中法联合实验室的卢汉清研究员和蔡志峰博士与笔者进行过多次有益的讨论，在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Cormack, A M J. Early two-dimensional reconstruction and recent topics stemming from IT. Nobel Lecture, Physiology or Medicine 1979. 1979, 551~563
- 2 Hounsfield G N. Computed medical imaging. Nobel Lecture, Physiology or Medicine 1979. 1979, 568~586
- 3 Zollikofer C P E, Ponce de León M S, Martin R D, et al. Neanderthal computer skulls. Nature, 1995, 375:283~285
- 4 Zollikofer C P E, Ponce de León M S. Computer-assisted paleoanthropology: methods, techniques and applications. In: Dong W ed. Proceedings of 1999 Beijing International Symposium on Paleoanthropology – In Commemoration of the 70th Anniversary of the Discovery of the First Peking Man Skull. Acta Anthropologica Sinica, 2000, 19(Suppl): 90~97

- 5 Weber G W, Kim J, Neumaier A, et al. Thickness mapping of the occipital bone on CT-data — a new approach applied on OH 9. In: Dong W ed. Proceedings of 1999 Beijing International Symposium on Paleoanthropology – In Commemoration of the 70th Anniversary of the Discovery of the First Peking Man Skull. Acta Anthropologica Sinica, 2000, 19(Suppl): 52~61
- 6 Ponce de León M S, Zollikofer C P E. Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. Nature, 2001, 412:534~537
- 7 Rayfield E J, Norman D B, Horner C C, et al. Cranial design and function in a large theropod dinosaur. Nature, 2001,409:1033~1037
- 8 Artzy F, Frieder G, Herman G T. 1981. The theory, design, implementation and evaluation of a three dimensional surface detection algorithm. Computer Graphics and Image Processing, 15(1):1~24
- 9 Baxter B S, Sorenson J A. Factors affecting the measurement of size and CT number in computed tomography. Invest Radiol, 1981, 16:337~34
- 10 Bomans M, Hohne K H, Tiede U, Riemer M. 3D segmentation of MR images of the head for 3D display. IEEE Trans Med Imaging, 1990, 2:177~183
- 11 Conroy G C, Vannier M W. Noninvasive three dimensional computer imaging of matrix filled fossil skulls by high resolution computed tomography. Science, 1984, 226:457~458
- 12 Zonneveld F W, Wind J. High-resolution computed tomography of fossil hominid skulls: A new method and some results. In: Tobias P V ed. Hominid Evolution: Past, Present and Future. New York: Alan Liss, 1985, 427~436
- 13 Luo Zhexi, Ketten D R. CT scanning and computerized reconstructions of the inner ear of multituberculate mammals. Journal of Vertebrate Paleontology, 1991, 11(2):220~228
- 14 Eubanks B A, Cann C E, Brand-Zawadski. CT measurement of the diameter of spinal and other bony canals: effects of section angle and thickness. Radiology, 1985, 157:243~246
- 15 Conroy G C. Enamel thickness in South African Australopithecines: noninvasive evaluation by computed tomography. Paleont Afr, 1991, 28:53~59.
- 16 Dean D, Kalvin A, Hublin J J, Braun M. Three dimensional CT composite reconstruction of Sale and Thomas Quarry cranial remains. American Journal of Physical Anthropology, 1993, 16(suppl):79
- 17 Rae T C, Koppe T. Isometric scaling of maxillary sinus volume in hominoids. Journal of Human Evolution, 2000, 38:411~423
- 18 Seidler H, Falk D, Stringer C, et al. A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill: implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. Journal of Human Evolution, 1997, 33:691~703
- 19 Ponce de León M S, Zollikofer C P E, Martin R D, et al. Investigation of Neanderthal morphology with computer-assisted methods. In: Stringer C B, Barton R N E, Finlayson J C eds. Neanderthals at the Edge. Oxford: Oxbow Books, 2000. 237~248
- 20 Zollikofer, C. P. E. and Ponce de León, M. S. Computer-assisted morphometry of hominoid fossils: The role of morphometric maps. In: de Bonis L, Koufos G, Andrews P eds. Hominid Evolution and Climatic Change in Europe. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 50~59

RECONSTRUCTION AND REMEDY OF VIRTUAL 3D IMAGES OF FOSSILS

DONG Wei^{1,2} LIU Jinyi¹ Marc JAEGER³ ZHU Qizhi³ DU Xiangke³

(1 Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044;

2 State Key Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

3 The joint Sino-French Laboratory in Informatics, Automation and Applied Mathematics, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

4 Radiology Department of Renmin Hospital, Peking University, Beijing 100044)

ABSTRACT

It was necessary to cut specimens if we need to study their interior morphology. But when the specimens are very rare and important, it is impossible to have them cut. The X ray clairvoyance is helpful for noninvasive examination of the interior anatomy of such specimens. But when the specimens are thick and the interior morphology is complicated, the multi-overlapping shadows will hinder a clear observation. The invention of computed tomography overcame this defect and it is possible to get a high resolution image of the interior anatomy of a specimen. The advancement of the computer technology furthered the possibility of reconstructing three dimensional images based on a series of two dimensional CT images. The application of this technology to the paleontology and paleoanthropology makes it possible to carry out noninvasive dissection of rare and important fossil specimens, to virtually reconstruct the lost or remedy the distorted parts of a specimen, and to duplicate a cast of the specimen based on the reconstructed and remedied virtual 3D images. It is of brilliant application future.

Keywords CT images, 3D reconstruction, noninvasive anatomy, remedy