

成年树鼯骨骼系统 CT 三维可视化模型建立及分析

罕园园[#], 徐昕[#], 陆彩霞, 匡德宣, 仝品芬, 王文广, 孙晓梅, 李娜, 代解杰^{*}

(中国医学科学院北京协和医学院医学生物学研究所树鼯种质资源中心, 云南省重大传染病疫苗研发重点实验室, 中国医学科学院医学生物学研究所实验树鼯标准化与应用研究省创新团队, 昆明 650118; 云南大学第一医院云南省第二人民医院暨云南省红十字会医院, 昆明 650051)

【摘要】 目的 建立树鼯骨骼系统的三维可视化模型, 为树鼯的骨骼系统疾病诊断提供依据。方法 使用日本东芝 Aquillon one 320 排螺旋 CT 进行扫描, 100 kV, 80 mA, 球管转数每转 0.35 s, 螺距 1.35, 图像为 0.5 mm, 层间隔为 0.5 mm, 使用骨算法重建。在并行计算环境中采用 Vitrea 软件包, 选择 Musculoskeletal CT 选项, 采用容积成像 (VR)、多平面成像 (MPR)、曲面成像 (CPR) 技术进行三维重建。结果 重建后的可视化模型结构明显、清楚, 可以真实地在计算机中重现出树鼯的骨骼系统三维模型。在此模型中, 在头骨背面可见五条隆起的嵴, 侧面观可见四个大孔: 位于前端的外鼻孔、前颌骨后上方的眶下孔、由颧弓所范围着的眼窝和鼓泡外侧的外耳道。此外, 可见一些较小的头骨孔, 如视神经孔、颌下神经孔。利用该成像技术可定量测定各主要骨骼的长度、前后径、左右径和身长、尾长等数据。尤其是还获得了以往通过解剖难以测量准确的数据: 如腭长、臼齿列长等较细微的数据, 以及解剖不易获得脊椎前后径及左右径的数据。同时还利用三维可视化技术发现了树鼯存在有骨盆形态不对称、胸廓增大、骨折、跟腱周围滑膜囊钙化的骨骼异常情况。结论 所建立的 CT 三维可视化技术可确定树鼯骨骼系统的特殊特征, 对树鼯骨骼系统无侵入性的生态分类、鉴定、进化分析均有重要意义。

【关键词】 树鼯; CT 三维重建; 骨骼系统

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1005-4847(2017) 02-0153-07

Doi: 10.3969/j.issn.1005-4847.2017.02.007

Establishment of CT 3D visualization models and analysis of the skeletal system in adult tree shrews

HAN Yuan-yuan[#], XU Xin[#], LU Cai-xia, KUANG De-xuan, TONG Pin-fen, WANG Wen-guang, SUN Xiao-mei, LI Na, DAI Jie-jie^{*}

(Center of Tree Shrew Germplasm Resources, Institute of Medical Biology, the Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College. Yunnan Key Laboratory of Vaccine Research and Development on Severe Infectious Diseases. Yunnan Innovation Team of Standardization and Application Research in Tree Shrew, Kunming 650118, China; Yunnan University First Hospital, the Second People's Hospital of Yunnan Province and Yunnan Province Red Cross Hospital, Kunming 650051)

【Abstract】 Objective To establish a visualization model of CT three-dimensional reconstruction of tree shrew skeletal system and to provide a basis for diagnosis of tree shrew skeletal system diseases. **Methods** We used Toshiba Aquillon One 320 row helical CT scan (voltage: 100 kV, electric current: 80 mA, bulb revolution: 0.35 s/roll, pitch: 1.35, image set: 0.5 mm, layer spacing: 0.5 mm, algorithm: bone reconstruction method, and we used volume imaging (VR), multi-planar imaging (MPR) and surface imaging technology by choosing Musculoskeletal CT option of Vitrea package in the parallel computing environment for 3D reconstruction. **Results** The reconstruction of visual model structure

【基金项目】 国家科技支撑计划项目 (2014BAI01B00); 云南省联合支持国家计划项目 (2015GA009); 云南省科技人才和平台计划项目。

【作者简介】 罕园园 (1983 年 -), 女, 助理研究员, 研究方向: 疾病动物模型。E-mail: hyy@imbcams.com.cn。徐昕 (1979 年 -), 男, 主治医师, 研究方向: 医疗影像学。E-mail: 532577157@qq.com。# 共同第一作者

【通讯作者】 代解杰 (1961 年 -), 男, 研究员, 研究方向: 实验动物标准化。E-mail: djj@imbcams.com.cn

is distinct, clear, allowing to truly reappear the tree shrew skeletal system in the 3D computer model. In this model, we identified five ridges on the back of the skull, and located four big holes in the lateral view. In addition, we showed some smaller skull holes, such as optic foramen and submandibular foramen. We determined the quantitative data of the tree shrew skeleton system more precisely and comprehensively. We also found some abnormal data in tree shrews, such as pelvic asymmetry, increased thorax, bone fracture and calcification in the synovial bursa. **Conclusions** The established CT 3-D visualization technique can determine special features of the skeletal system in tree shrews non-invasively, which is very important for ecological classification, identification, and evolution analysis of tree shrews.

【Key words】 *Tupaia belangeri*; CT three-dimensional reconstruction; Skeletal system diseases

Corresponding author: DAI Jie-jie, E-mail: dj@imbcams.com.cn

中缅树鼯(*Tupaia chinensis*)属于灵长目与食虫目之间独立的目—攀鼯目,由于与人类高度的同源性广泛应用于人类病毒性疾病^[1]、视觉系统^[2,3]、免疫系统^[4,5]、代谢性疾病^[6,7]、神经系统疾病^[8]和肿瘤^[9]方面的研究。树鼯已成为生命科学研究中非常重要的实验动物之一,是病理和药理学研究的有力工具,早有文献报告树鼯的全身骨骼形态与灵长目极其相似^[10],且骨骼生长状况和骨代谢也比大小鼠更接近于人^[11],也有文献利用对中缅树鼯头骨的形态分析,推断动物与生存的气候和地理环境适应的机制^[12-14],但以往树鼯骨骼系统数据的获得,均建立在动物标本、尸体解剖的基础上,数据获取的条件受限。

在其他实验动物中,利用计算机技术对生物体器官、组织进行三维建模已经广泛应用于形态学及医学影像诊断学研究中^[15]。骨骼的三维重建克服了X线片和CT二维图像的不足;可进行常规方法难以完成的解剖测量,重现骨骼形态,提供丰富的骨骼图像信息,对动物模型创建中的疾病判断和评价具有重要意义。但至今为止尚未有树鼯骨骼系统的CT三维建模数据,因此,一套非侵入性的精确的树鼯骨骼系统模型,对生物工程学、比较形态学、骨病研究等都是十分必要的,有着重要的应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料

由中国医学科学院医学生物学研究所树鼯种质资源中心【SCXK(滇)K2013-0001】提供成年树鼯(滇西亚种)20只,雌雄各半,3~4岁龄,动物麻醉后进行扫描。

1.2 数据获取

动物仰卧位,使用日本东芝 Aquillon One 320 排螺旋CT进行扫描,100 kV,80 mA,球管转数每转0.35 s,螺距 1.35,图像为 0.5 mm,层间隔为

0.5 mm,使用骨算法重建。

1.3 三维重建

在并行计算环境中采用 Vitrea 软件包,选择 Musculoskeletal CT 选项,采用容积成像(VR)、多平面成像(MPR)、曲面成像(CPR)技术进行三维重建。

2 结果

2.1 树鼯骨骼系统的三维重建模型

树鼯的全身骨骼按照着生部位可分为中轴骨和附肢骨两部分。中轴骨又分为头骨、脊柱、肋骨和胸骨;附肢骨包括前肢骨和后肢骨,可以完整的通过CT成像(详见图1)。

树鼯的头骨,吻鼻部较长,由上颌骨、前颌骨和鼻骨组成。在颅顶有两条明显的颞嵴,向后与顶嵴相连。在眼眶后部,由额骨的眶突向下延伸,并与颧骨相接,使眼眶形成一封闭环,(详见图2)。

树鼯的脊柱由55块脊椎骨组成,椎式为:C₇T₁₃L₆S₃Cy₂₆。从脊柱的全形来看,颈胸弯曲的最低点是在第一胸椎水平,棘突最高点为胸椎与腰椎连接处,以单个的脊椎骨而言,第4~7的棘突最高。枢椎的棘突发达而高耸,在前端,椎体前伸形成齿突,向前深入寰椎管成一回转轴,在齿突的两侧有大而光滑的关节面与寰椎相关节,如图3(右)所示。其中,胸椎共13块,椎骨前后径由上到下逐渐增加第一胸椎的形状棘突稍短,伸向上方。第2~8胸椎的棘突较长,向后倾斜,其顶端有微膨大的结节^[10],(详见图3)。

胸骨分7节,由前至后为胸骨柄、胸骨体和剑突。肋骨与胸椎数相同,共13对。树鼯的胸廓包括胸椎、肋骨、胸骨所包围的胸腔外廓。

同时,还可以对关注的某一部分骨骼进行精准成像,如足部骨骼、骨盆骨骼,(详见图4)。



图 1 树鼯骨骼系统的三维重建模型背侧观(左),腹侧观(中),右侧面观(右)

Fig. 1 3D reconstruction model of tree shrew skeletal system. The dorsal view (left), ventral view (middle), and right side view (right)



图 2 树鼯颅骨的三维重建模型背侧观(左),腹侧观(中),右侧面观(右)

Fig. 2 3D reconstruction model of the tree shrew skulls. The dorsal view (left), ventral view (middle), and right side view (right)



图 3 树鼯胸廓的三维重建模型背侧观(左),腹侧观(中),右侧面观(右)

Fig. 3 3D reconstruction model of a tree shrew thorax.

The dorsal view (left), ventral view (middle), and right side view (right)

2.2 定性数据的获取

对部分所采集标本的头骨特征进行成像显示, (详见图 2)。在此模型中,在头骨背面可见五条隆起的嵴,分别为枕外嵴:位于枕骨项面正中线上;项嵴:枕骨和顶间骨及顶骨相接、鼓骨上嵴:由顶间骨外侧和额嵴垂直相交处开始到达外耳听道;颞嵴:由鳞状骨颞突外侧缘向后延伸达鼓骨上嵴;额嵴:形成眼眶的上缘,由额骨外侧向后延伸越过顶骨和鼓骨。侧面观可见四个大孔:位于前端的外鼻孔、前颌骨后

上方的眶下孔、由颧弓所范围着的眼窝和鼓泡外侧的外耳道。此外,可见一些较小的头骨孔,如视神经孔、颌下神经孔。

2.3 定量数据的获取

树鼯各数据的测量均是通过双平面方法确定,保证数据的准确, (详见图 5)。

利用成像技术对各主要骨骼的长度、前后径、左右径等数据进行了定量测定,在获取了以往通过解剖获得的数据(如身长、尾长等)的同时,还获得了

以往通过解剖难以测量准确的数据,如腭长、臼齿列长等较细微的数据,还获得了利用解剖不易获得的

一些数据,如脊椎前后径、左右径等。(详见表 1,图 6)。

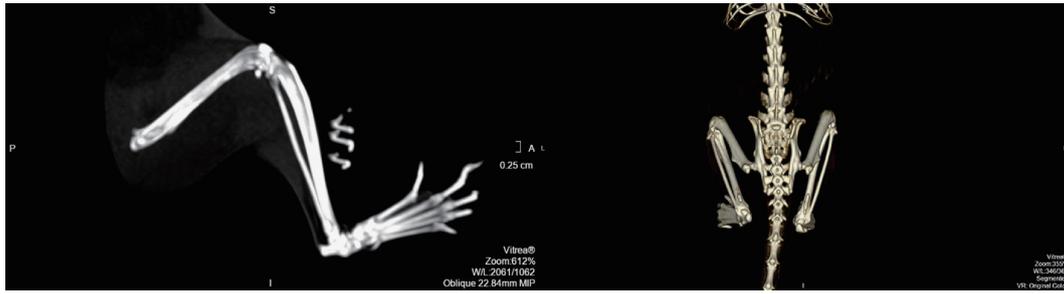


图 4 树鼯特殊部位的三维重建模型 MPR 法显示右下肢骨(左) VR 法显示骨盆(右)、双髋关节、腰椎、骶椎及部分尾椎(右)

Fig. 4 3D reconstruction model of some parts of tree shrews. The MPR displays right lower limb (left), VR displays double hip joint and lumbar spine, pelvis sacral vertebra and some of coccygeal vertebra (right)

表 1 树鼯骨骼系统的三维重建模型中获得的定量数据($\bar{x} \pm s$, $n = 10$)

Tab. 1 Quantitative data obtained by CT 3D visualization modeling and analysis of the adult tree shrew skeletal system

部分 Parts	测量项目 Item /mm	雌性 Female	雄性 Male
身体 Body	体积 Volume (mL)	160.41 ± 12.81	166.96 ± 14.54
	身长 Body length	185.0 ± 15.28	189.7 ± 15.27
头 Head	颅全长 Cranial length	46.4 ± 4.56	46.1 ± 3.87
	颅基长 Cranial base length	43.0 ± 3.48	42.7 ± 3.57
	颅高 Cranial high	15.3 ± 1.59	13.2 ± 1.21
	眶间距 Orbital spacing	13.6 ± 1.28	13.6 ± 1.15
	颧宽 Zygomatic width	24.9 ± 2.31	26.4 ± 2.35
	腭长 Palatal length	24.9 ± 2.54	24.4 ± 2.31
	腭宽 Palatal width	8.1 ± 0.69	9.1 ± 0.87
	枕骨孔前后径 Foramen magnum anteroposterior diameter	6.2 ± 0.57	6.5 ± 0.52
	枕骨孔左右径 Horizontal diameter of occipital foramen	6.5 ± 0.88	7.4 ± 0.88
	上臼齿列长 Upper molar column length	14.8 ± 1.28	15.2 ± 1.38
脊椎 Spine	下臼齿列长 Lower molar column length	15.3 ± 1.38	15.8 ± 1.37
	寰椎 Atlas	5.6 ± 0.51	6.1 ± 0.58
	枢椎前后径 Axis anteroposterior diameter	8.1 ± 0.74	8.2 ± 0.76
	枢椎左右径 Transversal diameter of axis	6.1 ± 0.53	6.5 ± 0.62
	尾椎 Caudal vertebra length	203.2 ± 17.35	221.9 ± 19.85
胸骨 Sternum	胸骨长 Sternal length	28.7 ± 3.08	31.6 ± 2.68
	剑突长 Xiphisternum length	8.1 ± 0.76	8.8 ± 0.84
	胸宽 Chest width	32.7 ± 2.87	31.4 ± 2.68
	胸深 Chest depth	28.7 ± 2.57	31.2 ± 2.68
	胸廓入口前后径 Anteroposterior diameter of thoracic inlet	5.6 ± 0.52	6.2 ± 0.57
前肢骨 Forelimb bones	胸廓入口左右径 Transversal diameter of thoracic inlet	10.5 ± 0.92	10.2 ± 0.92
	肱骨长 Humerus length	28.4 ± 2.38	28.7 ± 2.48
	尺骨长 Ulna length	29.9 ± 2.45	30.1 ± 2.57
	桡骨长 Radius length	26.3 ± 2.33	28.1 ± 2.48
骨盆 Pelvis	入口前后径 Conjugata of the pelvic inlet	11.8 ± 0.12	12 ± 1.69
	入口横径 Transverse diameter of pelvic inlet	12.0 ± 0.11	11.3 ± 1.85
	入口斜径 Oblique diameter of pelvic entrance	13.3 ± 1.71	12.3 ± 1.09
	中骨盆前后径 Anteroposterior diameter of midpelvis	9.8 ± 0.87	9.9 ± 1.08
	中骨盆横径 Transverse diameter of midpelvis	9.2 ± 0.82	10.3 ± 1.15
前后肢 Limbs	坐骨结节横径 Ishial tuberosity transverse diameter	9.3 ± 0.82	8.9 ± 0.95
	股骨长 Femur length	36.6 ± 3.05	36.4 ± 3.87
	胫骨长 Tibia length	38.3 ± 3.19	37.5 ± 3.55
	腓骨长 Fibula length	36.6 ± 3.04	35.6 ± 3.07

2.4 骨骼系统异常数据的获取

同时还发现了骨骼异常的数据并进行了展示, 这些异常包括骨盆形态不对称; 如图 7 所示, 左上:

骨盆倾斜; 右上: 胸廓增大; 左下: 骨折; 右下: 跟腱周围滑膜囊的钙化。对每一种可能的骨骼异常都进行了进一步的细节分析和诊断, 如骨折, (详见图 8)。

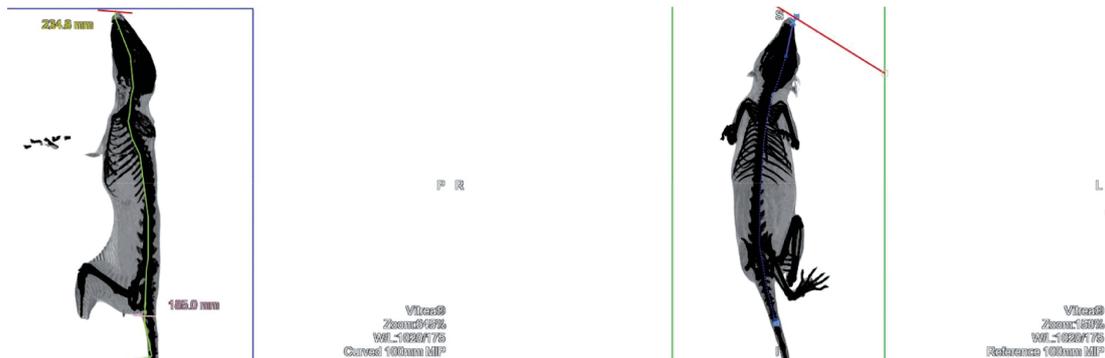


图 5 曲面重建方法测量体长矢状位、冠状位及横轴位相互确认矢状面确认(左); 冠状面确认(右)

Fig. 5 Double graphic method for determining quantitative data

Sagittal, transverse and coronal confirmation of each other. Sagittal plane(left); confirmation of coronal plane (right)

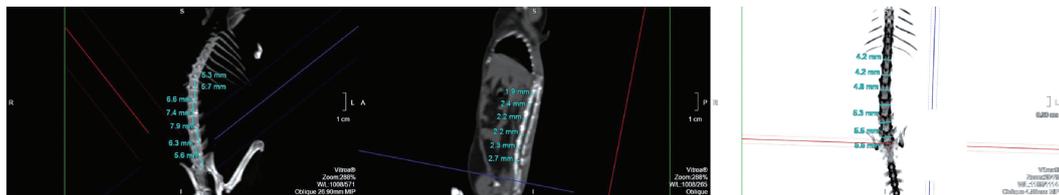


图 6 树鼯数据测定显示脊椎长度测定(左); 前后径测定(中); 左右径测定(右)

Fig. 6 Determination of the tree shrew vertebrae. Spinal cord length measurement (left); Anteroposterior diameter measurement (middle); Left-right diameter measurement (right)

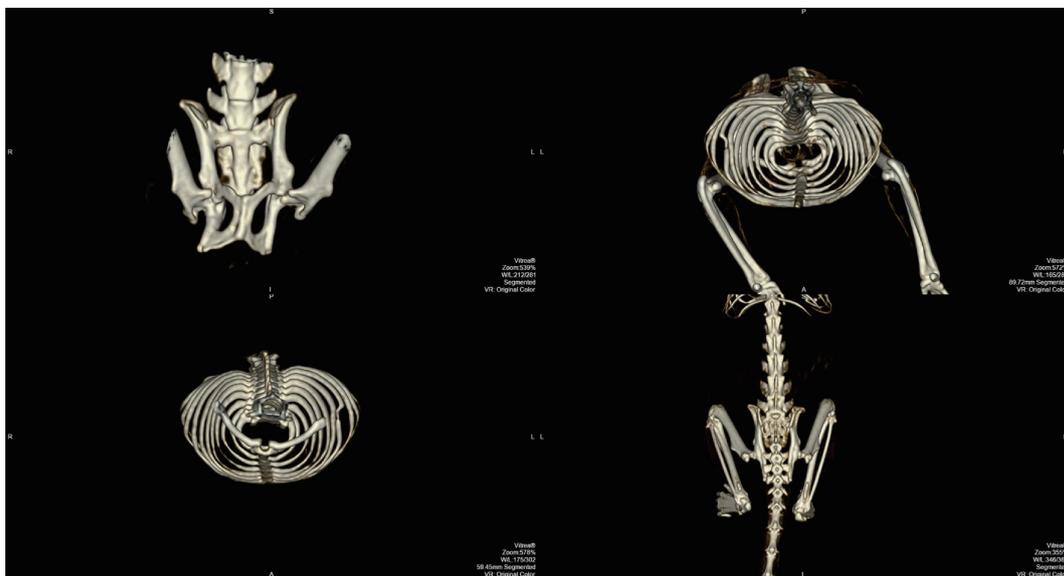


图 7 树鼯骨骼系统异常的诊断骨盆倾斜(左上) 胸廓增大(右上)
左第 8 肋骨腋段陈旧性骨折畸形(左下) 双侧跟腱周围滑膜囊钙化(右下)

Fig. 7 The 3D reconstruction model of tree shrew skeletal abnormalities

Upper left: Pelvic tilt. Upper right: Enlarged thorax. Lower left: Deformity of the 8th left rib axillary segment fracture. Lower right: Calcification of bilateral synovial bursa around the Achilles tendon.

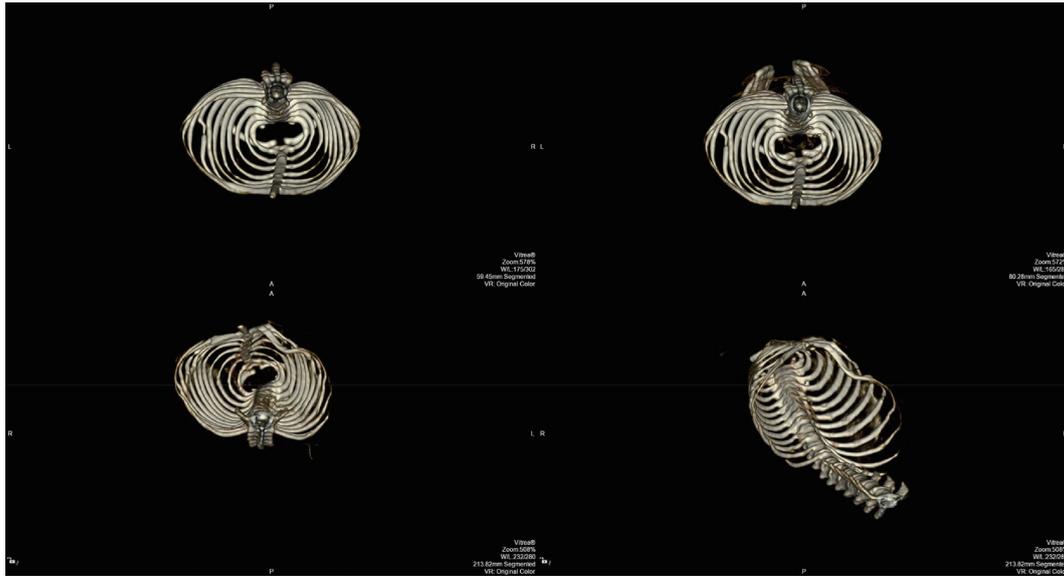


图 8 树鼯骨折的细节诊断胸廓正面观(左上)胸廓下面观;第 8 肋骨陈旧性骨折畸形愈合(右上)左 6、7、8、9 后肋陈旧性骨折(左下)左侧肋软骨弓塌陷并肋软骨异常增粗,胸骨形态扭曲(右下)

Fig. 8 Detailed analysis of the tree shrew bone fracture

Upper left: Inferior aspect of the thoracic front view. Upper right: Malunion of old fracture of the 8th rib

Lower left: Old fracture of the 6th, 7th, 8th and 9th ribs. Lower right: Collapse and abnormal enlargement of the left rib cartilage arch, and distortion of the sternum.

3 讨论

精确的树鼯骨骼系统模型可以作为一种重要的教育、科学研究资源,它不仅能帮助研究者们形象地了解树鼯骨骼系统具体的解剖结构,计算出树鼯骨骼在树鼯体内的空间位置以及不同骨骼之间相对空间位置关系。还可以借助计算机技术十分容易地对研究者所感兴趣的形态学参数进行测量,使得对树鼯骨骼系统进行定量和定性的分析成为了可能。因此,建立一套精确的树鼯骨骼系统模型必将在生物工程学、比较形态学、骨病等研究中发挥十分重要的作用,具有广泛的教育和应用价值。

首次利用 CT 影像技术,对树鼯进行三维数据重建,优化了扫描参数,实现了树鼯三维数据的数字化和多维可视化。在本次研究中,着重对树鼯的骨骼系统进行了测定,呈现了树鼯头骨的形态特征,包括头骨嵴缝特征,裂孔特征;对主要的骨头的进行了定量测定;在工作站上行最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)后行多平面重建(multi-planner reconstruction, MPR),于 x、y、z 三个轴面对所需测量器官的位置进行调整,调节层厚避开重叠部位并使所测器官充分展示,确认所测径线准确后进行测量,见图 7。为验证曲面重建法(CPR)在小

动物测量的有效性,实验动物麻醉采用自然仰卧位,没有进行肢体固定,沿身体长轴画线测量体长和尾长,采用三平面相互定位方法保证所画曲线与脊柱的椎体重合,曲面重建法见图 8。通过与之前已测量解剖数据的比较,结果准确可靠。同时,根据此次测量的结果,可以看出,树鼯有食虫目吻部较长,指端是爪的特征,各指、趾的长度,更接近人,适合抓握;同时其大脑比较发达,颅腔容积较大,眼眶后有骨桥并形成骨性眼眶,大拇指与其他指分开等狐猴的特征,与人类非常接近^[16,17]。

利用重建数据对此次扫描的 20 只树鼯中骨骼系统异常数据进行了展示和分析,在成像中可看到骨盆形态不对称:右侧耻骨下肢肥大并外翻,出现比例为 1/20;胸廓较正常的树鼯明显增大,出现比例为 1/20;肋骨出现骨折,出现比例为 3/20;跟腱周围滑膜囊的钙化,出现比例为 1/20,对每一种可能的骨骼异常都进行了进一步的细节分析和诊断,以骨折为例,左 6、7、8、9 后肋陈旧性骨折,左侧肋软骨弓塌陷并肋软骨异常增粗,胸骨形态扭曲,考虑为左侧多发肋骨骨折所致胸廓畸形。还有两只为多发的骨折,骨折部位均为一侧,位置居中,可能为单一方向外力一次作用的结果,考虑到动物为 3~4 岁龄,估计由于人工饲养过程中抓捕所致,这些结果在丰富

对树鼩骨骼系统的认识的同时,也提示在抓取动物时应该更加考虑到动物福利的问题。

利用 CT 影像技术测定树鼩的系统数据更有其优越性:一,动物仅需麻醉,不需要处死;二,测量更为客观,避免由于人为使用软尺操作的差异导致测量数据不准确^[11,17],尤其对于腭长、臼齿列长等较细微的数据测定更为明显,三,之前无法测量的数据也可以测量,如动物全身体积、各组织器官的体积等;四,快速进行骨骼系统的疾病诊断。

骨骼系统,头骨、足趾、脊柱等的数量和性状特征是研究生物进化、生态学的重要材料,本研究通过结合临床 CT 影像学技术,首次构建了树鼩的骨骼系统三维模型,在不牺牲动物的情况下,获得了甚至以常规方法难以完成的解剖测量数据,清晰重现树鼩的骨骼系统,提供了树鼩的丰富的骨骼图像信息,结果显示不同成年树鼩的骨骼系统的特殊特征。并通过与之前实验结果的比对验证了 CT 影像技术重建树鼩骨骼系统三维模型的可靠性,同时这些数据对我们种群中树鼩的生态分类、鉴定、进化分析有重要的意义^[18,19],为后续的动物模型创制提供了基础数据。本次研究中,由于使用的是临床 CT,因此获得的图片质量在准确度和精确度上不如专业的小动物 CT 成像,但在动物接受辐射剂量方面,临床 CT 普及率高,较小动物 CT 更易获得,在后续的试验中,也考虑改进技术方法,例如使用小动物专用 CT,对腕骨、跗骨等精密骨骼系统进行展示,此外,通过增大样本量使数据更为可信和准确。

参 考 文 献

- [1] Kouwaki T, Fukushima Y, Daito T, et al. Extracellular vesicles including exosomes regulate innate immune responses to hepatitis B virus infection [J]. *Front Immunol*, 2016, 7: 335.
- [2] Dai JK, Wang SX, Shan D, et al. A diffusion tensor imaging atlas of white matter in tree shrew [J]. *Brain Str Funct*, 2016, Sep 13. [Epub ahead of print] DOI: 10.1007/s00429-016-1304-z.
- [3] Lee KS, Huang X, Fitzpatrick D. Topology of ON and OFF inputs in visual cortex enables an invariant columnar architecture [J]. *Nature*, 2016, 533(7601): 90-94.
- [4] Xu L, Yu D, Fan Y, et al. Loss of RIG-I leads to a functional replacement with MDA5 in the Chinese tree shrew [J]. *Proc Nat Acad Sci U S A*, 2016, 113(39): 10950-10955.
- [5] Ruan GP, Yao X, Liu JF, et al. Establishing a tree shrew model of systemic lupus erythematosus and cell transplantation treatment [J]. *Stem Cell Res Ther*, 2016, 7(1): 121.
- [6] Zhang L, Wu X, Liao S, et al. Tree shrew (*Tupaia belangeri chinensis*), a novel non-obese animal model of non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Biol Open*, 2016, 5(10): 1545-1552.
- [7] Wu X, Xu H, Zhang Z, et al. Transcriptome profiles using next-generation sequencing reveal liver changes in the early stage of diabetes in tree shrew (*Tupaia belangeri chinensis*) [J]. *J Diab Res*, 2016, Article ID 6238526, 1-15.
- [8] Lin N, Xiong LL, Zhang RP, et al. Erratum to: Injection of A β 1-40 into hippocampus induced cognitive lesion associated with neuronal apoptosis and multiple gene expressions in the tree shrew [J]. *Apoptosis* 2016, 21(5): 621-640.
- [9] Ye L, He M, Huang Y, et al. Tree shrew as a new animal model for the study of lung cancer [J]. *Oncol Lett*, 2016, 11(3): 2091-2095.
- [10] 吴介云. 树鼩 *Tupaia belangeri chinensis* 的骨骼系统[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1987, 5(2): 79-88.
- [11] 李波, 张荣平, 李进涛, 等. 树鼩解剖数据的测定与分析[J]. *动物学研究*, 2013, 34(2): 132-138.
- [12] 贾婷, 林爱青, 王睿, 等. 云南不同地区中缅树鼩头骨形态特征的比较[J]. *兽类学报*, 2009, 29(3): 259-268.
- [13] 朱万龙, 付家豪, 杨晓蜜, 等. 中缅树鼩(*Tupaia belangeri*)头骨特征的研究[J]. *生物学杂志*, 2015, 32(5): 40-42.
- [14] 朱万龙, 贾婷, 黄春梅, 等. 中缅树鼩头骨及下臼齿几何形态与环境的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1721-1730.
- [15] 白雪岭, 李安安, 张杰, 等. 大鼠骨骼系统的三维重建模型[J]. *计算机与数字工程*, 2007, 35(2): 45-47, 189.
- [16] 孙晓梅, 夏雪山, 代解杰. 树鼩驯养繁殖实验动物标准及丙型肝炎动物模型技术平台建设的探讨[J]. *中国实验动物学报*, 2011, 19(2): 172-175.
- [17] Schilling N, Petrovitch A. Postnatal allometry of the skeleton in *Tupaia glis* (Scandentia; Tupaiidae) and *Galea musteloides* (Rodentia; Caviidae)—a test of the three-segment limb hypothesis [J]. *Zoology*, 2006, 109(2): 148-163.
- [18] Wu X, Chang Q, Zhang Y, et al. Relationships between body weight, fasting blood glucose concentration, sex and age in tree shrews (*Tupaia belangeri chinensis*) [J]. *J Animal Physiol Animal Nutr*, 2013, 97(6): 1179-1188.
- [19] Woodman N, Morgan JJ. Skeletal morphology of the forefoot in shrews (Mammalia: Soricidae) of the genus *Cryptotis*, as revealed by digital X-rays [J]. *J Morphol*, 2005, 266(1): 60-73.

[收稿日期] 2017-01-09