

高分辨数字人体三维结构数据集的构建与可视化

李安安^①, 刘谦^{①*}, 曾绍群^①, 唐雷^②, 钟世镇^②, 骆清铭^①

① 华中科技大学生物医学光子学教育部重点实验室, 武汉光电国家实验室(筹), 武汉 430074;

② 南方医科大学解剖学教研室, 广州 510515

* 联系人, E-mail: qianliu@mail.hust.edu.cn

2007-12-19 收稿, 2008-04-06 接受

国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA02Z343)资助项目

摘要 中国数字人研究是将人体解剖结构数字化和可视化, 建立具有组织形态、物理功能和生理功能的人体信息系统. 在获取的中国数字人体断层切削照片的基础上, 本研究对中国数字人体断层切削照片进行了预处理, 完成了中国男性数字人体生理系统主要器官和组织的分割、标识和命名; 用高性能计算集群, 对海量的分割数据进行并行快速三维结构重建, 构建了国际上分辨率最高的人体三维解剖结构数据集(体素 $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$); 在三维结构数据集的基础上, 开发了二维断层图像和三维结构可视化软件; 建立中国数字人体网站(www.vch.org.cn)进行数据集的共享、发布和推广. 该数据集是国家信息数据库和医学基础建设的重要组成部分.

关键词

中国数字人
解剖图谱
海量数据处理
三维建模
可视化

数字人研究是将人体解剖结构数字化和可视化, 建立人体组织形态、物理功能和生理功能的人体信息系统. 它是多学科交叉产生的前沿性课题, 近年来得到了国内外学者的广泛关注. 该研究源于 1989 年由美国国立医学图书馆发起的“可视人计划”(Visible Human Project, VHP)^[1]. 该计划于 1994 年成功获取一例西方男性解剖结构数据集, 1995 年发布了西方女性解剖结构数据集. 2000 年韩国开始了可视人研究的 5 年计划(Visible Korean Human, VKH), 并于次年获取了第一例可视韩国人数据^[2]. 目前, VHP 数据集已成为最流行的人体断层解剖数据集, 以 VHP 数据集为基础, 全世界的科研工作者在图像处理、三维建模、可视化软件开发、物理模拟等很多领域取得了重大成果^[3~5].

2001 年 11 月以“中国数字化虚拟人体的科技问题”为主题的香山科学会议第 174 次学术讨论会^[6]在北京香山召开. 会议提出了我国数字化虚拟人体研究的规划和建设, 揭开了我国数字化虚拟人体研究的序幕. 目前, 南方医科大学和第三军医大学都已获取高分辨的二维断层切削图像^[7~9], 基于上述二维图

像, 不同的研究机构进行了部分器官和组织的三维结构重建.

构建完整人体组织器官的三维结构数据集是数字人体应用的基础, 这些应用涉及医学、工业设计、航天和科教等诸多领域, 能够有效地提高工作效率, 降低成本, 统一人体模型标准, 避免人体标本使用中的伦理道德问题等. 其中, 在与人类身体关系密切的医学领域, 数字人三维结构数据集的应用最为广泛, 包括新治疗方法研究、手术导航、虚拟手术、临床诊断、核辐射评估与放射治疗、医学教育等. 本研究对中国数字人体男性主要器官和组织高分辨率三维解剖结构数据集的构建和三维可视化等技术进行了研究, 构建了世界上分辨率最高的人体三维解剖结构数据集.

1 材料来源

本研究所处理的原始数据来自中国数字人男性 2 号(Chinese digital human No. 2, CDH M2)人体断层切片数据集^[7]. 该数据集于 2005 年 3 月获得, 是目前世界上分辨率最高的人体断层切片数据集(表 1).

表 1 3 种数字人原始数据集的对比

	VHP	VKH	CDH M2
层间距/mm	1	0.2	0.2
总片数	1878	8590	9320(8952)
层内像素数目	2048×1216	3040× 2008	4080×5440
色深(Bit)	胶片(彩色)	24(彩色)	24(彩色)

CDH M2 源自无物理损伤的男性捐献遗体, 通过冰冻断层铣削成像方式获得 9320 张断层切片图像. 单张图像大小为 4080×5440 像素, 采用 24 位彩色深度. RAW(原始图像数据存储格式)格式下的数据总量达到了 260 GB (Giga Byte, Giga 为 10^9 , Byte 为字节), 总的空间分辨率约为 0.1 mm×0.1 mm×0.2 mm.

2 方法

本研究从 RAW 原始数据出发, 对数字人三维解剖结构数据集的构建和三维可视化进行了研究, 整体研究步骤见图 1. 图像处理是研究的开始, 涉及图像配准、图像压缩、图像分割等方面(图2). 三维重建是第二步, 它也被看成是一种“理解层次”的图像处理行为. 可视化研究建立在二维的图像处理数据与三维的建模数据基础之上.

数字人研究中的数据处理是海量的, 其平均数据处理任务量达到百 GB 级, 总的数据量更是达到了 TB 级(Tera Byte, Tera 为 10^{12}), 与传统的图像处理、三维建模和可视化工作相比, 需要更加高效的数据处理方法和更加强大的硬件支持. 本研究的海量计算任务都基于浪潮天梭 10000 高性能计算集群实现, 该

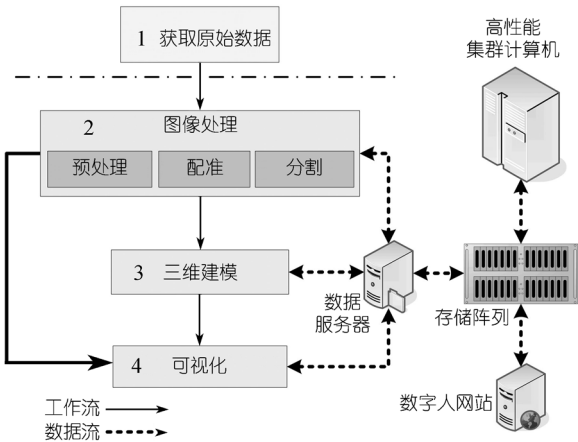


图 1 高分辨数字人体数据集的构建与可视化流程图

设备具有 17 个计算节点, 每个节点配备 2 个 Intel Xeon 2.4 GHz CPU, 各节点采用 InfiniBand 高速交换技术互联, 总的计算能力达到了 1000 亿次.

2.1 图像的预处理

数字人研究中的图像预处理包括 RAW 格式转化、配准、感兴趣区域(ROI)提取、无损图片压缩等. 预处理的目的是最大限度地降低图像获取过程中引入的空间和曝光误差、去除冗余数据、降低后期图像处理的难度.

(i) RAW 格式释放. RAW 是一种具有设备相关性的非图像格式的数据包, 需使用数码相机配套的解码工具进行格式释放. 这里将数字人原始数据从 RAW 格式释放为 24 Bit 深度的 TIFF (tagged image file format)非压缩图片格式.

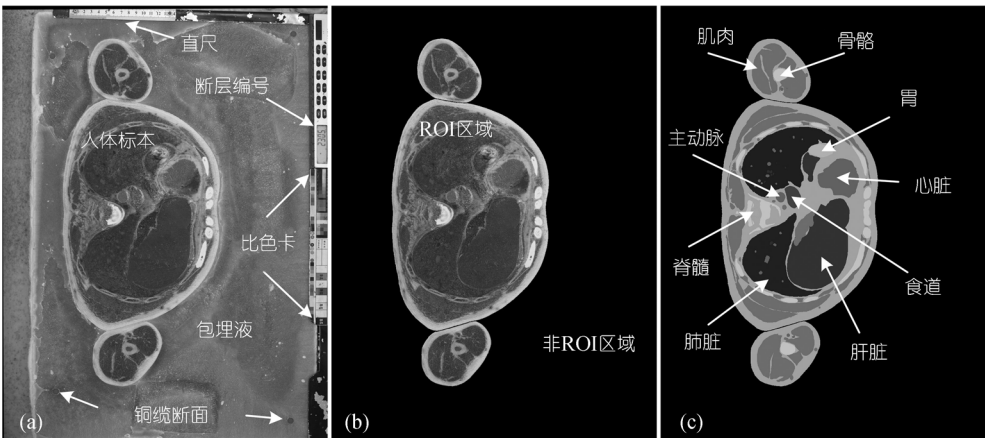


图 2 第 2305 号图片的图像处理结果

(a) 原始切面图; (b) 图像预处理结果; (c) 图像分割与标记的结果

(ii) 图像配准(image registration). 在数字人断层数据采集过程中, 因标本和照相机相对位置的不稳定会造成的一定的空间偏差, 需要通过图像配准来消除. 为了减低图像配准的难度, 预先将 4 根铜缆沿标本躺卧方向固定绷紧在人体包埋容器内, 与人体标本同时进行机械加工与成像. 铜缆在断层图片中产生的断面区域界线清晰, 区域重心被作为图像配准时标定. 标定点的位置提供了图像空间偏差的方式和程度, 这种偏差可以用 3 种简化的空间变换表示, 即水平位移、水平旋转和垂直缩放, 对于每一张断层图片, 都能够获得唯一的空间反变换矩阵, 再通过矩阵计算实现配准. 图像配准均在 Mathworks Matlab 环境中实现 [10].

(iii) 感兴趣区域(ROI)提取和无损图像压缩. 它们的作用是去除冗余数据, 实现海量数据存储和传输. ROI 指的是人体外轮廓以内的区域, 该区域以外的部分为包埋剂、比色卡、包埋盒等非人体组织, 为非感兴趣区域. 将 ROI 的面积占图像总面积的比例定义为图像利用率, 计算得到 CDH M2 数据集的平均图像利用率仅为 15% 左右, 即有 85% 的数据冗余. 将非 ROI 的像素亮度置零, 结合图像压缩算法, 可以有效地降低冗余区域存储, 提高计算和传输速度. 图像压缩采用无损 PNG 图像压缩格式, 具有显示速度快和利于网络传输等特点. 如需进一步提高计算和网络传输速度, 可采用 JPEG/JPG (joint photographic experts group) 压缩格式, 在牺牲部分分辨率的前提下, 相对于原始数据的压缩比可达到 1%.

2.2 组织器官的分割和标识

器官和组织的分割标识是构建三维结构数据集的基础, 它将数字人彩色断层图像与解剖学知识相结合, 把图像中具有特殊含义的不同区域分割开来. 提高人体切片数据图像分割的精度和速度是目前公认的瓶颈, 也是世界上数字人研究的热点. 图像分割一般有自动分割与基于图像处理软件的交互分割.

自动分割对分割对象的要求较高, 特别适用于高对比度的目标物, 如 CT 图片中的骨骼、绿色荧光蛋白标记的细胞等, 在 CDH M2 数据集中, 自动分割对象有软骨、人体外轮廓、红骨髓、血管、器官内轮廓等. 本研究使用 ITK (insight toolkit, 图像分割配准工具包) 的阈值处理、区域增长等工具包对红骨髓、器官内轮廓等进行了分割. 在实际使用中证明, 人机交互可以有效提高自动分割的效果, 因 ITK 不具备

可视化和 GUI (graphical user interface, 图形用户界面), 这里结合使用 VTK (visualization toolkit, 可视化工具包) 和 FLTK (the fast light toolkit, GUI 工具包) 对其进行扩展编程.

基于图像处理软件的交互式图像分割是本研究广泛使用的分割方法, 主要基于 Adobe Photoshop 图像处理平台, 其具有的优点包括强大的图像分割功能、海量数据处理、任务批处理、操作简易等. 交互式图像分割在图像对比度不高时, 分割准确度要高于自动分割, 大部分的器官和组织只能通过交互式图像分割获得. 交互式图像分割要求具备很好的人体解剖学知识和大工作量的投入. 所以, 组织器官的分割是工程量最大, 耗时最长和投入人力最多的课题. 为保证图像分割的客观性与准确性, 分割中有解剖学专家进行指导和评估, 并在分割前, 采用印刷行业的屏幕颜色校准方法进行颜色标准统一, 避免显示设备差异带来的分割误差.

经过图像分割获得的每一个结果都会有个唯一的标识, 该标识将以格式化文件名的形式赋给图片, 同时被数据库记录. 这里采用医学主题词表 (medical subject headings, MeSH) 命名体系和层次规范 [11], 它的唯一性是由生理系统类别、生理结构方位、器官类别、所处断层序号等层次关系实现. 其中, 生理系统类别指的是神经系统、运动系统、循环系统等; 生理结构方位指的是头、胸、腹等; 断层序号为被分割断层图片的序号.

组织器官的分割和标识结果采用 JPEG/JPG 图片格式保存, 压缩比率高, 每个像素用 8 位灰度表示, 不改变图像大小.

2.3 海量数据的三维建模

三维重建是最常用的建模方法, 它将二维信息拓展到三维空间中, 使信息更加直观和生动. 高分辨二维图像集是超过 GB 的数据, 构建同分辨率的三维结构数据只能采用并行图像三维重建完成. 并行三维重建使用 MPI (message passing interface) 并行库和 VTK 工具包.

海量数据的处理是三维建模中的主要困难. 对于全身性质的完整结构 (如皮肤), 重建过程需要一次性地消耗百 GB 级的内存空间, 普通计算机只有通过空间采样和分段重建等手段才能勉强达到要求. 对于椎骨、眼球等局部的小器官, 因其有效数据量较少, 可以在高性能图形工作站上进行重建. 经分析, 内存消耗主要与三维体素空间的尺寸大小相关, 通过数

3 结果与讨论

3.1 数字人数据集的构建

本研究建立的 CDH M2 数据集包括二维图像数据集和三维结构模型数据集.

二维图像数据集指的是进行预处理、配准、分割、压缩等图像处理产生的一系列图像子集. 主要的子集包括压缩的 RAW 原始数据集(A1)、解压的原始数据集(A2)、配准后的数据集(A3)、去除背景冗余信息后的无损压缩数据集(A4)、去除背景冗余信息后的有损压缩数据集(A5)和分割结果数据集(A6), 如表 2 所示.

三维结构模型数据集是三维重建的原始结果和从原始结果发展出来的一些三维模型子集. 到本研究截稿日为止, 已完成了人体运动 [14]、消化、呼吸、泌尿生殖、循环 [10]、神经、内分泌等生理系统的 260 个器官和组织的精细分割和三维重建(表 3, 图 5), 构建了国际上分辨率最高的人体三维解剖结构数据集(体素 0.1 mm×0.1 mm×0.2 mm), 之前精度最高的全身人体解剖模型为美国徐榭博士主持开发的VIP-

表 2 二维图像数据集统计表

数据集	切片数	存储量/GB	存储格式	色深 Bit	分辨率
A1	9320	260	RAW	—	4080×5440
A2	8952	552	TIFF	24	
A3	8952	552	TIFF	24	
A4	8952	40.8	PNG	24	
A5	8952	2.79	JPEG	24	
A6	>100000	>40	JPEG	8	

表 3 已分割和重建的人体组织器官^{a)}

人体生理系统	组织器官名称
运动	骨骼肌、骨骼(共 200 块, 不包括 6 块听小骨)、软骨(肋、耳、甲状软骨等)
消化	唾液腺、咽、食道、胃、肠、肝、胆、胰
呼吸	气管、肺
泌尿生殖	肾、肾脂肪囊、膀胱、包皮、附睾、睾丸、外阴茎海绵体、外尿道海绵体、阴茎海绵体、前列腺、输精管、精囊腺、尿道球腺、尿道、输尿管
循环	心脏、冠状动脉、动脉、静脉、脾、胸腺
神经	大脑灰质、大脑白质、小脑、脑干、脊髓
内分泌	脑垂体、肾上腺、甲状腺
其他	人体外轮廓、眼球、泪腺、眼肌、舌

a) 表中并未将具有左右对称结构的器官单独标出, 如肺和肾

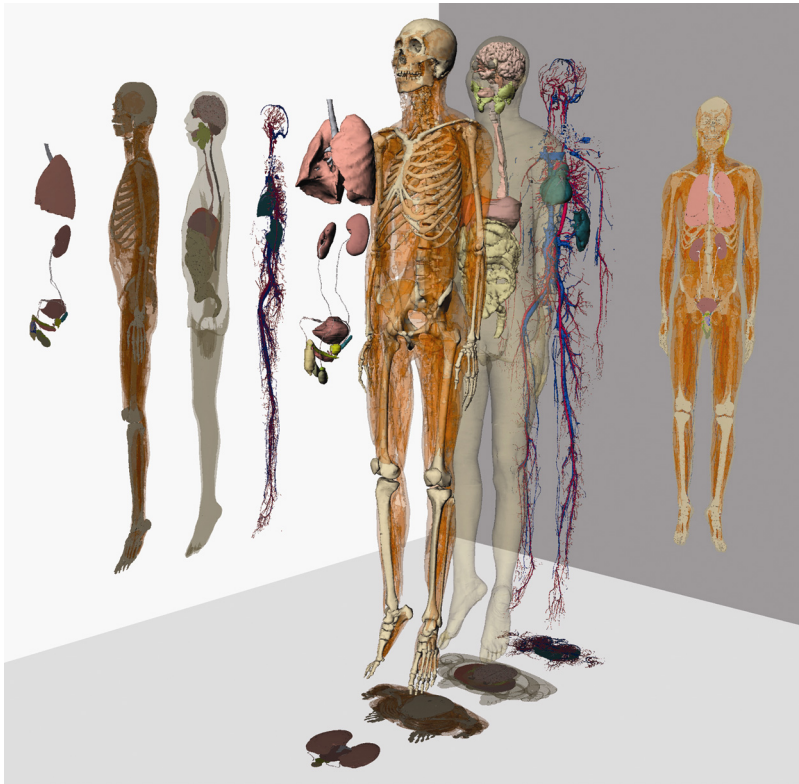


图 5 人体三维结构模型(B4)的组合显示

从前到后分别为呼吸与泌尿生殖系统组合, 运动系统组合, 神经、消化系统与外轮廓组合以及循环系统组合. 3 个平面投影分别为三维模型组合的侧视图、顶视图与前视图

MAN^[5], 每一个体素大小为 $0.33\text{ mm} \times 0.33\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. 考虑到原始重建结果(B1)数据量过大, 在实际的可视化研究中进行了三角面片的缩减, 构成了精简版的三维结构模型(B2). 由于可视化平台所支持的三维数据格式不同, 在B2基础上, 又建立了VRML (B3)、OIV (B4)等三维模型数据库(表4).

3.2 基于数字人数据集的各种可视化方法

本研究结果通过开发具有各种应用价值的可视化软件来展现, 主要包括二维图谱软件 CDH Atlas、三维模型浏览器 Clairvoyance Man、三维模型立体自动演示系统 CDH 3Dprojector 以及远程解剖教学系统等(图6).

CDH Atlas 是一款功能强大的电子版人体断层解剖图谱. 它基于 A4 和 A6 两个二维图像数据集, 实现了3个正交平面的人体断层图谱浏览, 提供了放大镜、直尺、面积尺、记号、器官识别等工具. CDH Atlas 可以代替一些常用的人体断层解剖图谱工具书, 用于医学领域.

Clairvoyance Man 是一款交互性极强的三维模型

浏览软件, 它基于 B4 三维模型数据集. 在该软件环境下, 用户可以自定义三维模型的组合形式, 任意改变模型的伪彩、光照和位置等属性, 在主界面的右侧提供了每个器官的解剖学介绍. Clairvoyance Man 操作简易, 内容丰富生动, 非常适合于科普与解剖教学.

CDH 3DProjector 是三维模型立体自动演示系统, 主要基于 B4 三维模型数据集. 该软件通过程序解读包含不同人体组织器官模型的组合、缩放、旋转、淡入淡出和透明等动作的剧本, 配以丰富的图片和文字说明, 通过立体投影仪, 将“场景剧”播放在金属投影幕布上, 参观者可佩戴立体眼镜获得良好的立体沉浸感. CDH 3DProjector 适合于科技馆等会展场合下, 数字人三维数据集的立体展示, 对其他三维数据集也具有兼容性.

人体解剖网上教学系统是一个基于 VRML 的网络三维模型浏览与教学站点, 它实现了类似于 Clairvoyance Man 的基本三维模型的交互, 并具备器官“拼图”功能, 是解剖网上教学的新尝试.

表4 三维模型数据集统计表

数据集	基于的数据集	数据量/MB	格式	编码方式	适合的可视化平台
B1	A6	950.2	VTK	ASC II	VTK
B2	B1	105.7	VTK	Binary	VTK
B3	B2	293.8	WRL	ASC II	VRML, VTK, OIV, 3DMax
B4	B3	252.4	IV	ASC II	OIV
	B3	104.7	IV	Binary	OIV

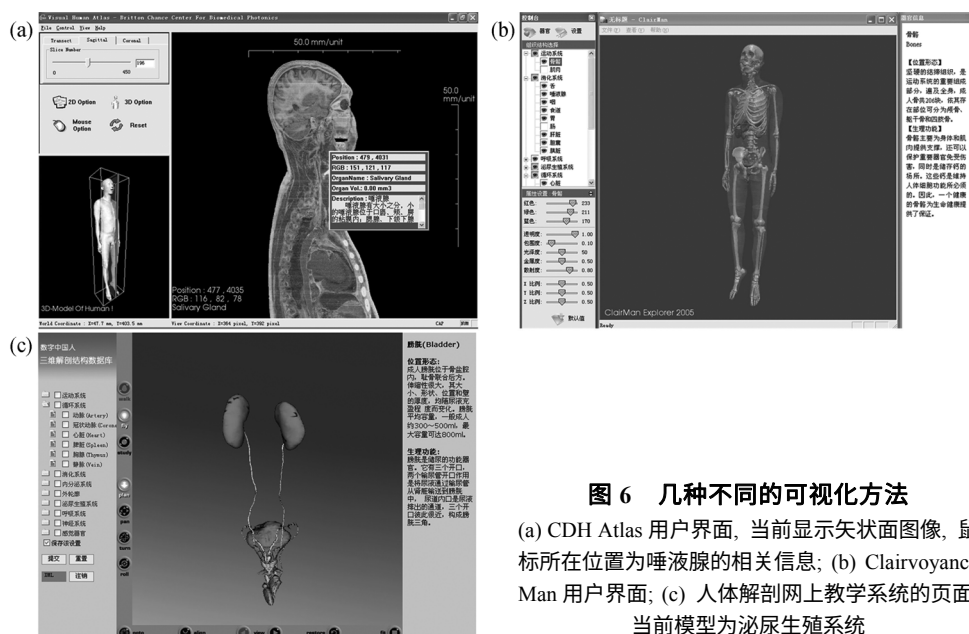


图6 几种不同的可视化方法

(a) CDH Atlas 用户界面, 当前显示矢状面图像, 鼠标所在位置为唾液腺的相关信息; (b) Clairvoyance Man 用户界面; (c) 人体解剖网上教学系统的页面, 当前模型为泌尿生殖系统

4 研究展望

数字人研究是多种学科交叉的大舞台,它的发展需要依靠计算机科学、信息科学、物理学、数学、医学、国防、体育、航天航空、自动化等诸多研究领域研究人员的共同参与。第174次香山科学会议已经将数字化虚拟人体研究概略地分为4个阶段,即虚拟解剖人、物理人、生理人和智能人阶段,虚拟解剖人正是本文所处的阶段。

构建虚拟解剖人是一个长期和困难的过程,特别是图像分割工作,美国VHP数据集就在近20年的时间里,不断改进与提高图像处理的质量,构建出越来越精细的人体组织器官三维模型。CDH M2在获取技术上明显领先于VHP,这也带来更大的数据处理难度——2005年,华中科技大学组织了24名研究生,由具有解剖教学和临床解剖经验的专家现场指导分割工作,花去三个多月时间,初步完成了50个人体组织器官的建模,奠定了本文最初的研究基础。

本研究的价值在于探索了一整套数字人海量数

据三维建模与可视化的方法,建立了多种人体二维和三维数据集。如同VHP数据集的发展一样,更多的研究机构将会使用CDH M2数据集进行相关开发,本文的研究成果将是他们工作的新起点。

在华中科技大学,高分辨数字人体数据集的构建与可视化研究仍在继续进行,包括改善图像处理和并行计算的方法,提高人体组织器官的分割程度,开发更加实用的可视化软件等,让数字人技术的最新成果走向应用,促进社会的发展和进步。除此以外,在已有高分辨数字人三维结构数据集的基础上,已经逐步开始人体组织结构的虚拟手术、力学模拟、辐射模拟^[15]等方面的研究,将数字人研究推进到“物理人”阶段。

总之,数字人技术具有重要的科学意义与广阔的市场前景,随着图像获取和信息技术的进步,将越来越精确模拟人体的各种功能和行为,可在医学、航天、航空、国防、体育、影视、汽车、服装等与人直接相关领域中提供可视的、虚拟的演示和科学实验的技术平台^[16]。

致谢 感谢华中科技大学生物医学光子学教育部重点实验室、武汉光电国家实验室(筹)生物医学光子学研究部多年来参与到数字虚拟人研究工作中的几十名师生,特别感谢南方医科大学解剖学教研室的李忠华和于涯涛两位老师的解剖分割指导。

参考文献

- Spitzer V M, AcKerman M J, Scherzinger A L, et al. The visible human male: A technical report. J Am Med Inform Assoc, 1996, 3(2): 118—130
- Chung M S, Kim S Y. Three dimensional image and virtual dissection program of the brain made of Korean cadaver. Yousei Med J, 2000, 41: 299—303
- Pommert A, Hohne K H, Pflesser B, et al. Creating a high-resolution spatial/symbolic model of the inner organs based on the Visible Human. Med Image Anal, 2001, 5(3): 221—227^[DOI]
- Robb R A. Virtual endoscopy: Development and evaluation using the Visible Human Datasets. Comput Med Imag Graphics, 2000, 24: 133—151^[DOI]
- Xu X G, Chao T X, Bozkurt A. VIP-MAN: An image-based wholebody adult male model constructed from color photographs of the visible human pproject for multi-particle Monte Carlo calculations. Health Phys, 2000, 78(5): 476—487^[DOI]
- 李增惠. 中国数字化虚拟人体的科技问题——香山科学会议第174次学术讨论会. 中国基础科学, 2002, 3: 35—38
- 唐雷, 李泽宇, 刘畅, 等. 构建高分辨率数字人男性数据. 医用生物力学, 2006, 21(3): 179—182
- 唐雷, 原林, 黄文华, 等. “虚拟中国人”(VCH)数据采集技术研究. 中国临床解剖学杂志, 2002, 20(5): 324—326
- 张绍祥, 刘正津, 谭立文, 等. 首例中国数字化可视人体完成. 第三军医大学学报, 2002, 10: 1231—1232
- 王文嘉, 刘谦, 龚辉, 等. 数字虚拟中国人男性一号循环系统的三维建模. 医用生物力学, 21(3): 198—202
- Medical Subject Headings. Bethesda(Md): National Library of Medicine, 2006
- Liu Q, Gong H, Luo Q M. Parallel visualization of visible chinese human with extremely large datasets. In: Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, 2005, Sep1~4, Shanghai, China. Shanghai: IEEE, 2005. 5172—5175
- 梁峰, 鲁强, 曾绍群. 一种基于MPI的并行体绘制算法. 计算机工程, 2005, 31(13): 171—173
- 李安安, 刘谦, 龚辉, 等. “虚拟中国人男性一号”高精度骨骼系统的三维建模. 中国临床解剖学杂志, 2006, 24(3): 292—294
- Zhang G Z, Liu Q, Luo Q M. Monte Carlo simulations for external neutron dosimetry based on the visible Chinese human phantom. Phys Med Biol, 2007, 52: 7367—7383^[DOI]
- 钟世镇. 数字化虚拟人体研究现状和展望. 解放军医学杂志, 2003, 28(5): 385—388