DOI:10.16016/j.1000-5404.201503141

论著

# 基于数字化人体的高精度器官模型3D打印初探

肖 嵚[1],谭立文[2],向明滟[2],王 田[1],王 红[3],张 楠[3],张绍祥[2] (400038 重庆,第三军医大学生物医学工程系:计算机科学教研室[1],数字医学研究所,重庆市计算医学研究所[2];266043 山东 青岛,青岛尤尼科技有限公司[3])

[摘要] **目的** 将数字化人体三维建模技术和计算机3D打印技术相结合,打印数字化人体器官模型。**方法** 以第三军医大学中国男性数字化人体数据集(Chinese Visible Human male dataset, CVH1)为基础,进行图像分割,对部分器官进行三维重建。利用青岛尤尼科技有限公司自主研发的UN-3D-S2型3D打印机打印3D模型,并完成抛光和着色。**结果** 应用3D打印技术打印出人体标本肝脏、耳蜗和脊柱等模型。模型与标本实体大小比例为1∶1,解剖结构标志非常清楚,适用于外科手术方案制定。**结论** 本研究通过医学高校与国内企业合作,将具有我国自主知识产权的3D打印技术与中国数字化人体技术结合起来,打印出解剖学特征非常明显的人体器官模型,在个性化手术方案设计等方面具有广阔的应用前景。

[关键词] 数字化人体;三维重建;3D打印技术
[中图法分类号] R319;R322 [文献标志码] A

# Application of 3D printing techniques in human organ models from Chinese Visible Human

Xiao Yu[1], Tan Liwen[2], Xiang Mingyan[2], Wang Tian[1], Wang Hong[3], Zhang Nan[3], Zhang Shaoxiang[2] ([1]Department of Computer Sciences, [2]Institute of Digital Medicine, Chongqing Institute of Computational Medicine, School of Biomedical Engineering, Third Military Medical University, Chongqing, 400038; [3]Qingdao Unique Products Develop Co., Ltd., Qingdao, Shandong Province, 266043, China)

[**Abstract**] Objective To print 3D human models by combining digital visible technology with 3D printing techniques. Methods Some digital organs based on the Chinese Visible Human male dataset (CVH1) were reconstructed, and printed to 3D human organ models by UN-3D-S2 3D printer which was independently researched and produced by Qingdao Unique Products Develop Co., Ltd. Then the obtained 3D human organ models were polished and colored. Results 3D human organ models were done with clear anatomical landmarks and the ratio between the 3D models and the real specimens was 1∶1, which was suitable for surgery plan design. Conclusion Based on the collaboration between medical university and domestic enterprise, this project combines the 3D printing techniques which is granted with Chinese intellectual property rights and digital human technology. Our achievements have a broad application prospect in individual surgical plan design.

[**Key words**] Chinese Visible Human; 3D reconstruction; 3D printing technique; digital human technology

Supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China (61190122). Corresponding author: Zhang Shaoxiang, E-mail: Zhangsx@tmmu.edu.cn

[基金项目] 国家自然科学基金重大项目(61190122)
[通信作者] 张绍祥,E-mail: Zhangsx@tmmu.edu.cn
[优先出版] http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1095.R.20150910.1106.013.html(2015-09-10)

数字化可视人体技术是人体解剖学与现代影像学方法、现代数控技术,以及计算机图形图像技术相结合,利用计算机建立全数字化的人体真实结构三维模型,从而实现人体解剖结构的三维可视化,能在可视化模型上进行人体解剖结构的任意切割和多方位显示[1]。人体可视化模型的建立是将解剖结构"由实变虚",在此类模型的应用当中,还需要一个"由虚变实"的过程。例如:在临床上,医生看着CT、MR图像进行手术方案的设计和讨论,不如看着能客观展示病灶三维形态及其与周围解剖结构关系的实体模型来得直接和全面;患者选用不同型号的人工假体植入,不如根据患者实际需要设计、制造出个性化人工假体进行植入来得适合。3D打印技术,又名快速成型技术,是一种不需要传统的刀具、夹具和机床就可以打造出任意形状,根据零件或物体的三维模型数据,通过成型设备以材料累加的方式制成实物模型的技术。由于其无需机械加工、装配及任何模具,能以更低的劳动力成本灵活快捷地生产少量产品,正好满足人体可视化模型"由虚变实"的需要。

无论国际还是国内,3D打印技术都得到了高度重视和广泛关注。2012年8月,美国总统奥巴马拨款3 000万美元,在俄亥俄州建立了国家级3D打印添加剂工业研究中心,并计划投入5亿美元资金用于3D打印技术[2]。中国在《国家高技术研究发展计划("863"计划)、国家科技支撑计划制造领域2014年度备选项目征集指南》中,高端装备及关键技术项目明确将3D打印关键技术、装备研制列为重大支持方向。

医学应用方面,2013年5月出版的《新英格兰医学杂志》发表公开信,科学家成功将3D打印出的气管支架植入婴儿体内。2014年4月9日美联社报道,美国路易斯维尔大学的科学家已经用3D打印的方式打印出人类心脏瓣膜以及小血管。实验证明,这些小血管在老鼠等小动物身上可以正常工作。国内3D打印骨骼技术也已取得初步成就,在脊柱及关节外科领域研发出几十种3D打印脊柱外科植入物,其中颈椎椎间融合器、颈椎人工椎体及人工髋关节三个产品,2013年被正式批准进入临床观察阶段[3]。

目前国内外3D打印器官模型的研究采用的器官标本数据集主要来源于CT或者MR等医学图像。CT和成像的途径都是间接的,通过计算机技术重建,在精细度和准确度方面存在一定的不足[4]。本研究的图像数据来源于第3例中国男性可视化人体断层数据集[5],其成像原理是采用明胶包埋、低温冷冻固定人体标本,然后在低温实验室中用数控铣床从头至足逐层铣切。同时逐层用高清晰度数码相机摄影,完成人体模型数据获取。这种直接获取的图像与真实人体基本上完全一致,优于CT和MR图像。该数据集层厚为0.1 mm,全身共计18 398个横断面,图像分辨率为1 098.9万(4 064×2 704)像素,是目前国内精细度最高的。

本研究尝试将具有我国自主知识产权的3D打印技术与中国数字化人体技术结合,3D打印制作数字化人体器官标本模型,并初步探讨3D打印技术在数字医学中的应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 数字化人体器官模型的建立

采用第3例中国男性可视化人体断层数据集,使用PhotoShop图像处理软件配合自编程序对连续图像进行分割、配准。使用Amira. v5.2软件对大脑、肝脏、脊椎、大肠等器官或部位进行三维重建,得到STL格式的三维数字化人体器官模型。

由于人体器官内部结构较为复杂,打印前需要使用Materialise. Magics. v18.03软件对模型进行处理,修复STL文件中三角形面片的缝隙、畸变、重叠等错误。部分相对简单的结构,如骨骼可省略这一过程。

### 1.2 3D打印机及其技术原理

青岛尤尼科技有限公司研制的Anyprint中型3D打印机,型号:UN-3D-S2,采用熔融堆积成型技术(FDM),打印层厚为0.1~0.4 mm,最大打印尺寸为400 mm×300 mm×200 mm。打印材料为ABS树脂塑胶丝,支撑材料为reprap/mendel可溶解塑胶丝。

熔融堆积成形技术工作原理:将热塑性成形材料丝通过加热器的挤压头熔化成液体,由计算机控制挤压头沿零件的每一截面的轮廓准确运动,将熔化的热塑材料丝从喷嘴挤出,覆盖已建造的零件,并在极短的时间内迅速凝固,形成一层材料。挤压头向上运动一微小距离进行下一层材料的建造。逐层由底到顶地堆积成一个实体模型或零件。其优点为使用或维护简单、成本较低、速度快、无污染。

1.2.1 软件部分 软件系统包括分层软件、设备驱动软件等(图1)。分层软件:将模型沿某一方向(如Z方向)离散为一系列的二维层面(称为分层或切片),得到一系列的二维平面信息(截面信息)。运用基于几何拓扑信息提取的分组分层算法和基于可着色语言计算,生成可控的能被打印设备闭环控制系统识别的运动程序。设备驱动软件:相应参数文件及打印模型的分层数据的装载、分配任务、调用各功能模块,以及控制运动机构的运行。实现对各运动部件的运动状态监测,在打印过程中实时地向运动控制卡下载打印数据。

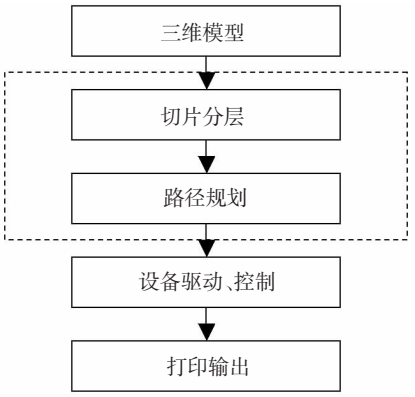



**图 1　数字化人体标本 3D 打印软件系统框图**

1.2.2　硬件部分　　硬件系统由主体框架、运动机构、打印喷头和电路控制等部分组成。运动机构包括三轴运动机构以及进料机构，传动采用滑动导轨与滚珠螺杆配合。选用双膜片联轴器，不仅传递较大的扭矩和实现长轴距的联接，同时可以自动纠正轴系之间同心度偏差，实现简单而平稳的转动。打印喷头包括 2 个微注射喷头，打印材料用加热熔融的方法降低黏度，然后通过微注射喷头输出成型。微注射喷头总成由电机、丝杠、活塞、料仓、加热元件等组成，容积为 30 mL。电路控制采用全闭环控制，实现三轴运动，以及进料装置协调工作，采用先进 PID 算法控制温湿度，达到精度高、超调小的性能要求。

1.3　3D 重建模型打印及后期处理

将 STL 文件导入打印机配套的 Easy Printer 软件，设置打印参数。左喷头：可溶解塑胶丝，打印支撑结构；右喷头：ABS 塑胶丝，打印模型；层高：0.2 mm；左喷头温度：250 ℃，右喷头温度：230 ℃，底板温度：110 ℃。打印生成标本模型后，放入柠檬烯溶解剂中浸泡以溶解去除支撑结构。最后使用喷漆技术对模型进行着色。

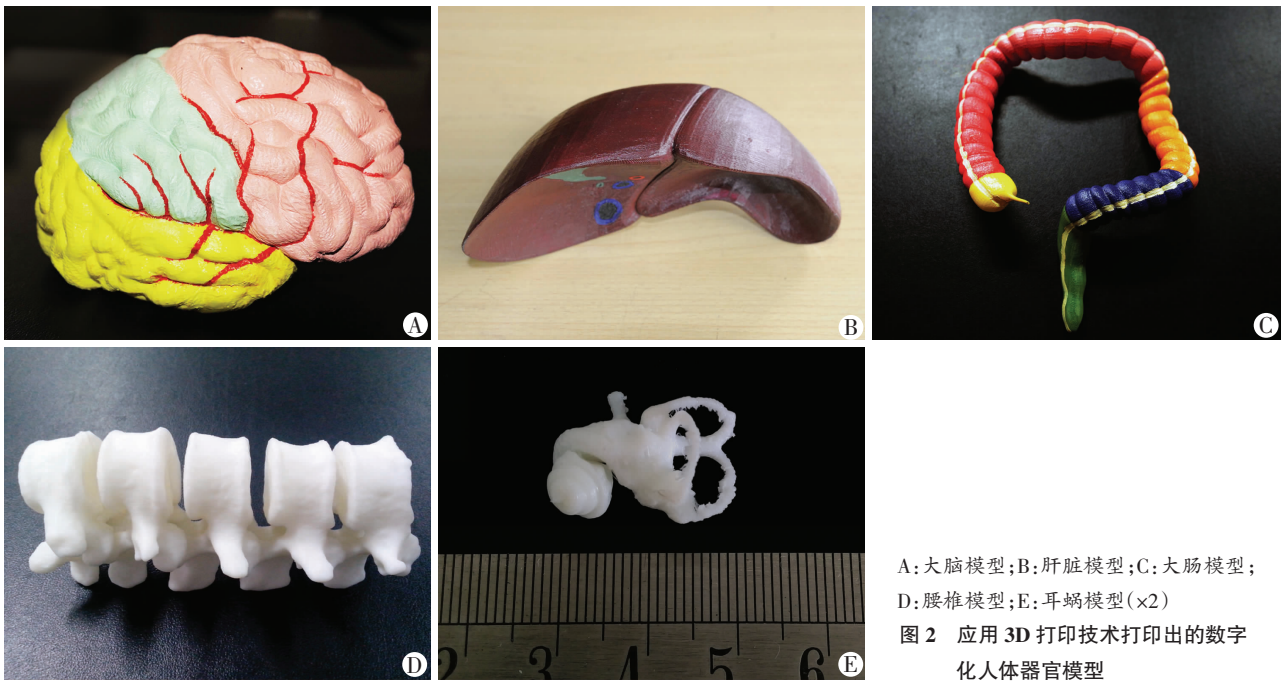
## 2　结果

应用 3D 打印技术打印出基于中国数字化人体数据集的大脑、肝脏、大肠、脊柱、耳蜗等模型（图 2）。打印出的模型与人体器官标本实体大小比例为 1∶1，外观结构清晰，与器官实体高度一致。以大脑模型为例，脑叶、外侧沟回、表面的动脉及其分支均得到了较好的展示。本研究采用的打印设备和人体器官数据模型均具有完全自主知识产权。

## 3　讨论

3.1　可视化人体数据集的优点

本研究所采用的图像数据来源于第 3 例中国男性可视化人体断层数据集，其成像原理决定了该数据集在完整性和准确性上优于 CT 和 MR 等活体成像技术所采集的图像。该数据集采集的层厚仅为 0.1 mm，是目前国内最精细的。以此为基础打印的器官模型能够更精确地显示器官的细部特征，更好地用于辅助制订各种外科手术的术前计划，有利于术前作出更准确诊断，制定更详细的手术方案[6]。




A：大脑模型；B：肝脏模型；C：大肠模型；D：腰椎模型；E：耳蜗模型（×2）

**图 2　应用 3D 打印技术打印出的数字化人体器官模型**

3.2 数字化人体标本3D打印技术的应用

3.2.1 在外科手术中的应用 在人工耳蜗植入手术中,耳蜗形态的术前评估是决定手术是否成功的关键因素之一。不常见的解剖结构尤其是耳蜗的盘曲模式和方位的变异可能会影响鼓阶内电极束的通过和定位,因而对耳蜗结构的精确判断是选择电极和制订手术方案的重要参考依据。通过三维重建患者耳蜗并打印出等比例的实体模型,可直观有效地展示耳蜗底回平面与矢状面夹角,以及耳蜗底部长和宽的变异,辅助外科手术路径和电极设计的优化,从而减少耳蜗内电极植入所带来的创伤,提高人工耳蜗对电信号和声信号的接受能力[7]。

在肝胆外科手术中,3D打印技术可快速制造出与术中大小位置完全一致的透明化3D模型,使外科医生跳出"凭空想象"的窘境,在术前即可从多维度真实预见术中解剖,明确重要管道的走行,制定手术路径和程序并预演手术[8]。在3D打印技术的辅助下,外科医生可借助肝脏解剖机构的3D地图,精确定位病灶并确定正确手术路径,实现完整切除病灶和避免重要解剖结构损伤的多目标优化。

在骨科的螺钉植入手术中,以3D打印的患者骨骼模型作为依托,设计制作个体化导航模板,辅助螺钉植入,可有效提高置钉准确率,简化手术操作[9]。

3.2.2 在个性化医疗中的应用 3D打印人工骨是目前3D打印技术在医学领域中最成功技术之一。通过三维重建的患者缺损部位模型与中国可视化人的三维模型进行拟合,可以打印出与患者原有部位相似度更高的人工骨,有利于提高患者的舒适度[10]。

3D打印活体人造组织、器官的技术将是最吸引人的一项挑战。因为打印材料可以使用患者体内的细胞,所以不会产生排异反应,有很好的应用前景。实现器官打印的难点在于如何实现打印器官的功能性,这还需要进一步的研究。例如美国维克森林大学再生医学研究所发布的最新科研成果,可以由一台3D生物打印机放置多种类型的肾脏细胞(由活体组织提取出的细胞培育而成),打印出活体细胞构成的肾脏[11]。不过打印制造出来的肾脏还无法发挥功能。

3.2.3 在模拟人体试验中的应用 基于安全性的考虑,许多行业的人体试验都需要用假人来代替,比如汽车撞击安全试验、武器杀伤效应试验等。目前普遍使用的都是内装传感器的粗放型假人[12]。结合数字化人体3D打印技术,可以制造出成本更低、结构更细致、拟人性更好的试验假人。

3.3 问题与挑战

本研究深入的瓶颈在于打印技术和打印材料的局限。目前所使用的打印设备只支持FDM方法,应用范围受限,还需要进一步拓展。比如使用细胞作为原材料打印活性组织的生物3D打印机,正在本课题组的研发当中。现有的打印材料颜色单一,只能靠后期处理的表面着色,没有实现真正的彩色打印。还没有研制出能够充分模拟软组织的柔软和弹性的仿生材料,打印出来的模型用途仅限于实体展示和学习使用,还无法完全替代解剖标本。

目前,3D打印技术在数字医学中的应用研究在国内还处于初创阶段,但已显现出良好的发展势头,在医学教育、个性化医疗等方面都具有广阔的应用前景。

**参考文献:**


[1] 张绍祥. 数字化人体与数字医学的研究概况及发展趋势[J]. 第三军医大学学报, 2009, 31(1): 1-2.

[2] Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution[J]. Business Horizons, 2012, 55(2): 155-162.

[3] 管吉, 杨树欣, 管叶, 等. 3D打印技术在医疗领域的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2014, 29(7): 71-72, 135.

[4] 杨剑, 方驰华, 范应方, 等. 基于亚毫米CT扫描数据的肝外胆管供血动脉三维可视化模型构建[J]. 南方医科大学学报, 2014, 34(7): 945-949.

[5] 张绍祥, 刘正津, 谭立文, 等. 第3例中国数字化可视人体数据集报告[J]. 第三军医大学学报, 2003, 25(15): 1332-1335.

[6] Rengier F, Mehndiratta A, von-Tengg-Kobligk H, *et al*. 3D printing based on imaging data: review of medical applications[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2010, 5(4): 335-341.

[7] 罗扬拓, 初金刚, 李巍, 等. 应用CT三维重建对正常人群耳蜗方位和盘曲模式的研究[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2014, 28(10): 697-700.

[8] 方驰华, 方兆山, 范应方, 等. 三维可视化、3D打印及3D腹腔镜在肝肿瘤外科诊治中的应用[J]. 南方医科大学学报, 2015, 35(5): 639-645.

[9] 陆声, 徐永清, 李严兵, 等. 脊柱椎弓根定位数字化导航模板的设计[J]. 中华创伤骨科杂志, 2008, 10(2): 128-131.

[10] Meursinge-Reynders R, Ronchi L, Ladu L, *et al*. Insertion torque and orthodontic mini-implants: a systematic review of the artificial bone literature[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2013, 227(11): 1181-1202.

[11] Romano P E. 3D printing live stem cells; hobbit in 3D; super "retina displya"; your microbiome; hospitals takeover; income taxes; bicyclists; deer dangers[J]. Binocul Vis Strabolog Q Simms Romano, 2013, 28(1): 52-64.

[12] 柳松杨, 徐元铭, 杨春信. 航空航天仿真试验假人研制[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 191-194, 201.


(**收稿**:2015-03-02;**修回**:2015-07-07)

(编辑 郭建秀)