

计算机三维重建结合3D打印技术用于医学实训教学的实践研究

刘 莉¹ 陆志东^{*2}

1. 宁夏医科大学总医院医学3D打印工程技术研究中心 宁夏 银川 750004

2. 宁夏医科大学总医院骨科 宁夏 银川 750004

摘 要：传统医学实训教学存在空间认知难度大、教具同质化、实操训练不足等弊端。本文将计算机三维重建与3D打印技术相结合，依托医学影像数据构建高精度个体化实训模型，应用于解剖与临床操作实训教学。通过分组对照教学实验对比教学成效，结果显示该融合教学模式可显著提升学生理论水平与实操能力，教学满意度更高。研究明确了技术应用价值与现存短板，为医学数字化实训教学改革提供实践依据。

关键词：计算机三维重建结合3D打印技术；医学实训教学；实践

引言：传统医学实训多依托教学图谱、标准模具与人体标本开展教学，存在结构展示抽象、缺乏个体化病理特征、实操训练受限等诸多弊端，难以满足现代医学精准实训的教学需求。随着数字化技术快速发展，三维重建与3D打印技术为医学教学改革提供了全新思路。本文融合两项技术构建高精度个性化医学实训模型，应用于解剖与临床实训教学，探究其教学应用价值，助力提升医学实训的针对性与实效性。

1 相关技术与理论基础

1.1 计算机三维重建技术理论

(1) 医学影像三维重建的基本原理：依托CT、MRI等断层扫描数据，通过体素建模或面绘制将二维像素序列重构为三维空间体数据，核心在于坐标映射与灰度赋值，实现解剖结构的数字化再现。(2) 常用医学三维重建算法与技术类型：包括基于阈值的表面绘制法（如MarchingCubes）、基于光线投射的体绘制法，以及基于深度学习的分割-重建联合框架，临床常用Mimics、3DSlicer等专业软件完成。(3) 医学模型三维重建的精度与优化标准：精度受层厚、分辨率、分割误差及插值算法影响，临床要求线性尺寸误差 < 1mm，通常以Dice相似系数和Hausdorff距离作为评价指标，并通过平滑滤波与网格简化进行优化。

1.2 3D打印核心技术体系

(1) 3D打印技术的工作原理与主流工艺：基于逐层累积成型原理，医学领域主流工艺包括熔融沉积成型（FDM）、光固化立体成型（SLA）和粉末床熔融（SLS），分别适配不同精度与材质需求。(2) 医学专用3D打印材料的特性与选型依据：常用材料有PLA、光

敏树脂、尼龙及PEEK等，选型依据包括生物相容性、力学匹配度、灭菌兼容性及模型用途（教学模型侧重成本与可塑性，植入物侧重生物安全性）。(3) 3D打印医学模型的成型精度控制要点：需控制层厚（0.05–0.2mm）、打印温度、支撑结构及后处理收缩率，并结合切片算法优化与设备校准，确保模型还原度满足教学与术前规划要求^[1]。

1.3 数字化医学实训教学理论

(1) 沉浸式实训教学理论内涵：强调通过高仿真三维模型与交互环境，营造“身体在场”与“认知沉浸”的学习状态，促进学习者直觉化理解复杂解剖空间与手术操作逻辑。(2) 可视化教学对医学实训的赋能机制：将抽象影像转化为可触可操作的实体模型，打通“影像观察—空间推理—动手操作”的认知链条，有效缩短理论学习与临床实操之间的迁移距离。(3) 新技术融合教学的适配性理论支撑：基于建构主义学习理论与认知负荷理论，三维重建与3D打印作为认知工具，可分层拆解复杂知识，降低工作记忆负担，实现“做中学”与个性化教学的有机统一。

2 计算机三维重建结合 3D 打印技术的医学实训模型构建

2.1 医学实训模型数据采集与预处理

(1) 医学影像数据（CT、MRI）采集规范：CT选用64排以上螺旋CT，层厚0.625~1.25mm，螺距0.8~1.2，管电压120kV，管电流依BMI自适应调节，确保骨与软组织对比清晰；MRI依靶组织选序列，骨肌采用T1WI及T2WI压脂，层厚 ≤ 3mm，视野覆盖目标区域，DICOM无损导出，保留空间定位信息。(2) 影像数据

降噪、分割与预处理：降噪采用各向异性扩散或非局部均值滤波，去噪保边；分割综合运用阈值分割（CT值200~1500HU）、动态区域生长（软组织）及手动轮廓描绘，对毗邻组织用形态学腐蚀膨胀分离连接区，最后经线性插值补全层间信息，形成连续掩膜^[2]。（3）实训模型关键结构筛选与保留原则：以解剖教学和临床操作要点为导向，优先保留典型骨性标志、主要血管神经通道及病灶特征区，剔除扫描伪影、床板干扰及非教学无关软组织；对细小骨赘或非关键分支适度简化，确保聚焦核心知识，兼顾打印材料消耗与成型时间约束。

2.2 医学模型计算机三维重建实现

（1）三维重建软件平台选型与操作流程：选用MimicsResearch21.0作为核心重建平台，联合3-Matic进行模型修复与优化，MeshLab用于格式转换和网格简化；标准化操作流程为“DICOM导入→组织蒙版创建与编辑→三维表面网格计算→网格后处理修复→模型导出验证”五阶段，全流程实行版本控制确保可追溯性。（2）人体器官、骨骼等实训模型重建过程：以膝关节为例，依据骨组织阈值提取股骨、胫骨及髌骨蒙版，逐层编辑剔除游离骨岛，计算生成三角面片网格，经平滑因子0.4优化并保留关节面软骨厚度；肝脏模型则采用增强CT门静脉期数据，手动勾画肝实质轮廓，结合阈值法提取肝内管道系统，完整保留肝动脉、门静脉及胆管三级分支结构。（3）重建模型修复、优化与格式转换：针对生成网格进行空洞填充、自相交检测与消除、非流形边修复，运用拉普拉斯平滑去除阶梯状伪影；采用二次边缘塌陷算法进行三角面片减缩（减缩率 $\leq 25\%$ 保留细节），最终导出STL格式并通过Netfabb进行壁厚分析、悬垂检测及打印可行性校验，确保模型无打印缺陷^[3]。

2.3 医学实训模型3D打印成型制备

（1）打印参数设置与模型切片处理：根据模型精度要求和材质特性选择SLA光固化工艺（精度0.05mm）或FDM熔融沉积工艺（精度0.1mm），设定层厚0.05~0.1mm，实训教具填充密度控制为15%~20%以节省材料，添加树状支撑结构并以45°悬垂角为判定基准，经切片软件生成打印路径G-code文件并模拟预览，排查潜在打印失败风险。（2）医学实训模型3D打印成型过程：将切片数据导入打印机，SLA工艺设置底层曝光时间45~60s、单层曝光6~10s，FDM工艺设定喷头温度210~220℃、热床温度60℃，打印全程监控平台附着性及层间粘合质量，保持环境温度25±2℃、湿度 $\leq 40\%$ ，大型模型拆分多个部件分别打印后预留装配接口^[4]。（3）模型后处理与质量检测：SLA模型经95%酒精超声清洗去

除残留树脂，置于紫外固化箱中二次固化20~30min；FDM模型经手工打磨及丙酮蒸汽抛光提升表面质量；质量检测包括目视检查表面缺陷、数显卡尺实测关键解剖尺寸（允许偏差 $\leq 0.5\text{mm}$ ）、结构承重稳定性测试，合格后标注解剖标志并归档入库，作为标准化实训教具投入使用。

2.4 融合技术的模型应用优势分析

（1）相较于传统教具的可视化优势：传统教学模型为标准化通用模具，缺乏个体解剖变异与真实病理特征呈现；融合技术以真实患者影像数据为蓝本，重建模型可精准呈现肿瘤形态、骨折类型、血管畸形等个体化病变特征，同时支持任意剖切观察内部断面、透明化显示管道系统，将平面影像转化为可旋转、可拆解的立体教具，显著增强教学直观性。（2）模型精准度、实用性与实训适配性优势：重建模型尺寸误差控制在亚毫米级，解剖标志定位精度远超传统铸模产品；模型可根据教学需求定制不同难度版本，如完整版、半剖版及核心结构孤立版，覆盖解剖认知、术前规划、手术模拟等多元实训场景；同时模型制备周期短、可批量复制，造价低于定制化实体标本，兼具高保真度与经济性，在医学院校及临床培训中具有广泛推广价值。

3 计算机三维重建结合3D打印技术在医学实训教学中的实践应用与效果分析

3.1 医学实训教学实践方案设计

（1）实训教学对象与课程选取：选取某医学院临床医学专业大三学生120人，随机均分为实验组与对照组。课程选取《人体解剖学》骨骼肌肉系统模块及《外科学总论》骨折内固定操作单元，内容涵盖解剖结构辨识、病变特征认知及基础手术入路训练。（2）传统教学与新技术教学对比实验：对照组采用传统塑料模型、图谱及标本讲授，配合石膏模型练习；实验组引入三维重建可视化模型及3D打印个性化实训模型。两组授课教师、教学大纲及考核标准一致，实验周期8学时，分别进行前测（基础知识摸底）与后测（理论与操作考核）。（3）实训教学流程与实施细则：实验组教学流程为“影像数据导入→重建模型三维展示→3D打印模型触控操作→小组协作病例分析→操作考核”五环节，各环节时间分配为展示10min、模型操作20min、病例讨论15min、考核15min。同时制定模型使用维护规范与安全操作手册，确保教学过程标准化、可复现。

3.2 融合技术的实训教学应用场景

（1）人体解剖实训教学应用：利用三维重建模型实现骨骼肌肉系统的任意旋转、剖切与透明化观察，学生

可直观理解复杂空间毗邻关系；配合3D打印实物模型进行触觉感知与结构标记训练，弥补传统图谱二维局限与标本数量不足的短板，尤其适用于关节结构、颅底孔道及盆腔等复杂区域的精细化教学。（2）临床操作模拟实训教学应用：基于3D打印模型开展骨折复位与内固定物置入操作训练，模型内置不同密度的皮质骨与松质骨分层结构，模拟真实钻削手感；同时可制备包含典型病变（肿瘤、骨折、畸形）的模型，供学生进行切口设计、剥离路径规划及内固定方案选择等全流程操作演练。

（3）疑难病例分析与术前规划实训应用：选取临床典型疑难病例（如复杂骨盆骨折、肝门部胆管癌）的影像数据重建并打印模型，学生分组进行病例讨论、手术方案制定与模拟操作，通过模型预演验证方案可行性，将真实临床问题引入课堂，有效衔接基础理论与临床思维训练。

3.3 教学效果调研与数据统计

（1）学生实训成绩对比统计分析：实验组理论知识平均成绩为85.6分（对照组78.3分），操作考核平均成绩为82.4分（对照组70.1分），两组差异具有统计学意义（ $P < 0.05$ ）；尤其在解剖标志定位准确率和操作步骤规范性两个维度，实验组提升最为显著。（2）学生学习体验、教学满意度问卷调查分析：面向实验组发放问卷调查35份，回收有效问卷33份，统计显示87.9%的学生认为三维模型“显著提升空间理解能力”，90.9%对3D打印模型触感真实度表示满意，整体教学满意度达93.9%，开放式反馈普遍认可“看得见、摸得着”的融合教学模式提升了学习兴趣与参与度。（3）教师教学反思与实训效果评价：授课教师反馈融合技术模型有效缩短了课堂讲解时间，学生自主提问质量明显提高；同时教师指出当前模型制备周期较长、数量有限，尚不能完全满足大规模班级同时使用需求，但对教学效果的提升作用获得一致肯定。

3.4 教学实践问题与优化策略

（1）技术应用于教学过程中的现存问题：主要包括三个方面：一是模型制备周期约3-5天，难以满足临时教

学调整需求；二是教师团队对重建软件和打印设备的操作熟练度参差不齐，技术门槛制约推广；三是模型材质与真实人体组织手感仍有差距，精细操作训练的真实感有待提升。（2）针对实训教学痛点的优化改进策略：建立标准化的常见解剖模型数字库，实现“随用随打”的快速响应机制；定期组织教师技术培训（每学期不少于2次），编制作业指导手册降低操作门槛；探索多材料复合打印工艺，在关键部位（关节软骨、血管壁）采用软硬材料梯度打印以提升触感仿真度。（3）长效化、常态化教学应用方案：构建“校级医学3D打印实训中心”共享平台，统筹设备管理与模型生产；将三维重建与3D打印技术纳入医学实训课程常规教学大纲，设立专项建设经费保障模型更新迭代；同时建立教学效果动态评价体系，每学期采集数据持续改进，形成“资源建设—教学应用—效果反馈—迭代优化”的良性循环机制。

结束语

本研究证实三维重建联合3D打印技术可有效弥补传统医学实训教学短板，通过高仿真实体模型搭建沉浸式教学场景，切实提升医学实训教学实效与学生综合学习能力。研究同时发现技术应用存在制备周期长、操作有门槛、仿真度待提升等问题。未来将通过搭建数字模型资源库、开展师资培训、优化打印工艺等方式持续完善，推动该技术常态化、规模化应用，赋能医学实训教学数字化高质量发展。

参考文献

- [1]李阳.医学影像三维重建联合3D打印技术在解剖实训教学中的应用[J].解剖学杂志,2023,46(2):235-238.
- [2]张博文.数字化三维重建与3D打印融合的外科实训教学模式构建[J].医学教育探索,2023,22(6):721-725.
- [3]杨佳琪.数字化3D解剖模型在医学生临床技能实训中的应用价值[J].卫生职业教育,2024,42(18):87-90.
- [4]吴启凡.医学三维重建与3D打印技术的实训教学优化策略[J].工程技术研究,2025,10(9):131-133.