

数字医学在精准骨科手术中的应用

王博亮^{1*}, 蔡明¹, 郭晓曦¹, 段少银², 宋晓¹, 黄绍辉¹

(1. 厦门大学信息科学与技术学院, 2. 厦门大学附属中山医院, 福建 厦门 361005)

摘要: 现代骨科医学与计算机科学的融合促进了数字骨科医学的发展. 通过厦门大学计算机系生物医学实验室在数字骨科医学领域取得成功的 3 个典型案例, 验证了数字骨科医学应用计算机三维图像处理技术和多种数字图像处理方法, 可以直观地显示病人病变部位的骨骼形态, 并且在术前设计手术方案, 可以预测术后效果, 精准度优于传统医学方法.

关键词: 数字骨科医学; 图像处理; 手术计划

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2013)02-0202-04

数字医学是以现代医学和数字化高新技术相结合, 涵盖了医学、计算机科学、数学、信息学、电子学、机械工程学等多学科的一门新兴的交叉学科领域. 医学与生物学以及计算机科学的深入融合推动外科进入一个以精准为特征的新时代. 数字医学通过数字化手段辅助传统医疗技术, 实现人体各部位精准有效的手术治疗, 其中包括肝脏的可视化研究^[1-2], 鼻咽部的三维重建^[3], 以及软组织的受力分析^[4]等.

数字骨科医学是数字医学在骨科手术领域的应用, 通过计算机三维图像处理技术和多种数字图像处理方法, 读取医学成像设备输出的计算机断层扫描图像, 再对骨骼数字图像进行切割、拼接、测量、受力分析等一系列处理, 制定手术方案, 模拟手术过程, 评估手术结果, 在骨科手术中起重要指导作用^[5]. 本文将介绍厦门大学信息科学与技术学院数字医学图像处理实验室在数字骨科医学领域取得成功的 3 个典型案例.

1 数字骨科医学在强直性脊柱炎截骨矫形术中的应用

利用自行设计的 CT 影像理解手术模拟仿真软件以及商用软件 Mimics10.01, 通过读取断层扫描图像

建立患者骨骼的三维模型. 依照患者脊柱后凸的畸形程度, 选择不同的截骨部位和截骨角度, 制定多种手术计划方案, 比较术后的效果, 确定最佳手术方案. 数字医学手术计划的关键点在于模拟术后效果, 为手术方案的确定提供技术依据. 图像采集于 GE Medical Systems/LightSpeed 16 型计算机断层扫描系统, 图像格式为 DICOM3.0, 图像序列共 855 张图片, 单张图片分辨率为 512×512 像素, 像素大小 0.703 mm , 层厚 0.625 mm .

1.1 病人资料

广州南方医院强直性脊柱炎后凸畸形患者, 男性, 年龄 21 岁, 病史 5 年, 脊柱呈后凸畸形, 无腹主动脉轻度钙化, 肺功能测定通气功能正常, 心功能正常. 在手术计划的选取上, 采用手术中操作较为简单的单平面截骨方案, 共有 2 套可行方案供选择. 第 1 套手术计划针对腰 3 椎体进行楔形截骨, 第 2 套手术计划针对腰 2 椎体进行楔形截骨, 需要通过数字医学方法判断最优方案.

1.2 预处理阶段

在预处理阶段, 需要对断层扫描图像序列进行预加工, 包括三维重建、图像提取以及图像分割. 在该阶段中, 脊柱部分将被提取出来, 以便进行下一阶段的虚拟手术.

通过读取断层扫描参数, 图像在 x 轴和 y 轴上的像素间距 0.703 mm , 在 z 轴上的像素间距 0.625 mm . 根据像素间距以及像素的 CT 值, 使用手术模拟仿真软件对二维断层扫描图像序列进行三维重建. 由经验数据可知, 在断层扫描图像中骨骼对应的 CT 值在 $226 \sim 1\,807$ 之间. 分割处于该范围内的三维图像各

收稿日期: 2012-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(30770561, 61271336); 卫生部科学研究基金-福建省卫生教育联合攻关 II 期计划项目(WKJ2008-2-41)

* 通信作者: blwang@xmu.edu.cn

个像素点,取其中体积最大的一块连通区域作为目标对象,并删除其他小块对象,得到包括脊柱、肋骨、肩胛骨在内的所有骨骼的三维形态.

对于后期的虚拟手术以及术后效果评价而言,最佳的视角为脊柱部分的侧面观,而肋骨、肩胛骨等与截骨手术无关的骨骼影响对脊柱的观测处理. 利用三维空间中的二维平面对骨骼进行虚拟切割,去除大部分肋骨以及全部肩胛骨,剩下脊柱部分,以便于虚拟手术.

1.3 虚拟手术阶段

在虚拟手术阶段,根据 2 套脊柱楔形截骨手术计划进行虚拟手术,根据手术结果判断最优手术方案以及参数. 本阶段需要使用到三维测量、图像分割、图像旋转以及图像拼接技术.

根据截骨位置和三维空间关键点坐标位置信息,生成两个相交的二维平面切割预处理阶段生成的三维脊柱模型得到楔形截骨,使用空间坐标距离和空间线段夹角计算得到截骨的长度和角度. 在虚拟手术中,脊柱被切割成了 2 部分,将脊柱的上半部分旋转一定角度并与下半部分拼接形成一个整体,即手术后的结果预览. 在本阶段结束后,2 种手术方案对应不同的手术结果.

1.4 实验结果

根据第 1 套手术计划虚拟手术的结果(图 1(a)),病人脊柱的术前形态和术后形态同时呈现. 根据虚拟手术的结果,该手术计划的结果能直观地看出存在矫正过度的问题,不能采纳. 第 2 套手术计划的结果相比而言能将病人的脊柱将恢复到正常的形态(图 1(b)),在手术计划中效果最优,故予以采纳.

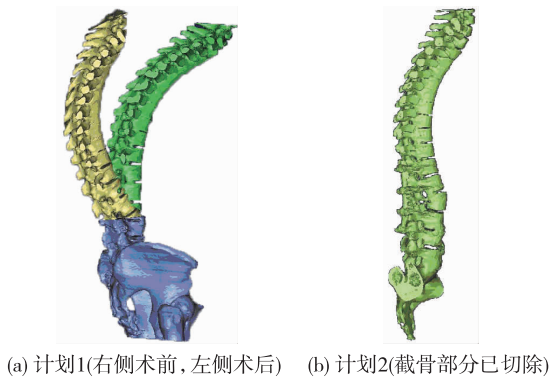


图 1 脊柱截骨手术计划的结果
Fig. 1 Result of surgical plan I and II

为更好地指导实际手术,对楔形截骨的长度和角度进行了测量(图 2). 把数字医学手术计划的测量结

果、传统医学方法的测量结果以及实际手术的测量结果相比较显示,数字医学的准确程度高于传统医学方法(表 1). 术后患者脊柱断层扫描图像序列显示,实际手术结果与数字医学手术计划的模拟结果一致.

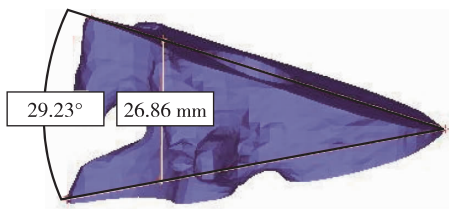


图 2 截骨长度与角度的测量
Fig. 2 Length and angle measurement in surgical planning of vertebral osteotomy

表 1 传统医学与数字医学在计算准确度上的比较
Tab. 1 Comparison of accuracy between traditional medicine and digital medicine

测量方式	截骨长度/mm	截骨角度/(°)
传统医学	24.12	34.70
数字医学	26.86	29.23
实际手术	约 28	

广州南方医院对本次数字医学虚拟手术计划的评价如下:通过计算机手段对病变脊柱进行三维重建及模拟截骨,可以使术者在术前对手术区域的解剖结构有更加明确的认识;对手术方案的三维构思更加客观、定量;能将手术信息与其他手术者及患者共享,对手术设计具有指导意义. 不足之处在于,由于脊柱及邻近结构的复杂性,手术截骨的临床效果往往很难得到计算机模拟截骨的理想矫正度数,缩小两者的差距有赖于提高手术技巧以及提高计算机模拟截骨的仿真程度. 建议从手术需要出发,进一步应用此方法研究截骨前后椎管内脊髓、神经以及椎旁血管、软组织的移位情况,对于手术部位的选择以及截骨量的确定具有重要的临床实用价值.

2 数字骨科医学在巨颅畸形全颅再造手术中的应用

利用自行设计的 CT 影像理解手术模拟仿真软件以及商用软件 Amira4.0,根据断层扫描结果重建患者的脑部模型,其中包括颅骨、脑、血管和脑积液. 根据病人的年龄及颅骨外形,确定针对上半部分颅骨进行切割拼接的手术计划,并模拟生成术后效果. 本次手术计划的关键点在于确定颅骨拼接方案,模拟拼接后的效果,并计算重建后的颅腔体积是否与病人的大脑体积

相匹配. 断层扫描图像采集于 GE Medical Systems/LightSpeed 16 型计算机断层扫描系统, 图像格式为 DICOM3. 0, 图像序列共 224 张图片, 单张图片分辨率为 512×512 像素, 像素大小 0.703 mm, 层厚 0.625 mm.

2.1 病人资料

厦门第一医院巨颅畸形患者刘京, 男性, 9 岁, 病史 9 年, 患有先天脑积水, 颅骨重度畸形, 头顶大面积颅骨缺损, 身体虚弱, 发育迟缓; 2 岁半时做一次引流手术, 体内埋有一引流管将脑积液引入腹腔. 医生采用病人自体颅骨切割后拼接塑型、钛网修补的方法, 需要使用数字医学为手术制定计划.

2.2 虚拟手术的过程

利用断层扫描的结果重建了病人头部的三维模型(图 3(a)). 根据不同的 CT 值取值范围, 把颅骨、大脑、脑积液、血管进行分离. 从颅骨眉弓上方 1 cm 处至耳后引流口上方 1 cm 进行环型切割, 分割后取颅骨的上半部分作为虚拟手术中待处理的模型. 根据医生提出的手术方案进行虚拟手术. 先将模型切割为多个子块, 分别进行三维空间上的旋转、平移等操作, 将子块放置到目标位置. 当所有子块放置完毕, 再进行虚拟拼接, 将子块重建生成成为一个整体(图 3(b)、(c)). 虚拟手术阶段结束后, 生成手术计划的效果图.

使用三维测量方法分别计算术前模型中脑组织的体积和手术计划生成的术后颅腔体积, 比较两者间的大小关系. 颅腔体积略大于脑组织体积说明方案可行, 否则颅腔不适合病人, 需要拼接修改方案.

2.3 实验结果

第一套手术计划使用的拼接法由于分块太多导致拼接过程异常费时, 不利于手术进行, 而且不能很好地保证病人前侧颅骨的强度, 故不予采纳. 第二套手术计划在实施中比较简单, 颅骨前侧采用大块颅骨作为保护, 效果图亦能说明手术结果将比较好地将病人颅骨

恢复成正常头型. 通过计算得到脑组织的体积为 $1\,636\text{ cm}^3$, 术后颅腔体积为 $1\,692\text{ cm}^3$, 手术计划中模拟拼接的颅腔适合病人的脑组织.

手术后再造的颅骨形态以及各块颅骨的位置与虚拟手术基本保持一致(图 3(d)). 患者头颅恢复正常形态, 颅腔的体积和脑组织体积与虚拟手术的预测结果一致.

3 数字骨科医学在寰枢关节旋转力学分析中的应用

利用自行设计的 CT 影像理解手术模拟仿真软件以及有限元分析软件 Ansys, 读取临床 PACS 寰枢关节三维断层扫描图像数据, 图像层厚 1.25 mm. 通过对寰枢关节有限元模型进行旋转运动力学分析, 确定寰枢关节受力脱位时最可能的损伤部位. 该受力分析的关键点在于分析有限元模型不同部位的受力大小, 确定受力最大点.

3.1 有限元分析过程

对断层扫描图像进行三维分割操作, 将骨结构、韧带及关节周围连接等部位提取出来. 使用有限元分析软件建立寰枢关节的三维模型, 对寰枢关节的三维模型进行体网格划分, 并添加结构的物理属性和材料参数(表 2), 构建寰枢关节有限元模型(图 4(a)、(b)).

用 ANSYS 力学分析软件对寰枢关节有限元模型施加载荷, 得到寰枢关节在进行旋转等动作时的受力情况分布, 以判定寰枢关节复合体中脆弱部位. 用寰枢关节三维有限元模型, 在中立位正上施加 40 N 压力载荷模拟头部重力, 再施加 $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 水平旋转力矩, 受力分布主要集中在 C1 后弓, C2 齿突和棘突, C3 棘突, 深灰色部分为应力集中处(图 5).

3.2 实验结果

根据模拟结果, 受力分布主要集中在 C1 后弓, C2

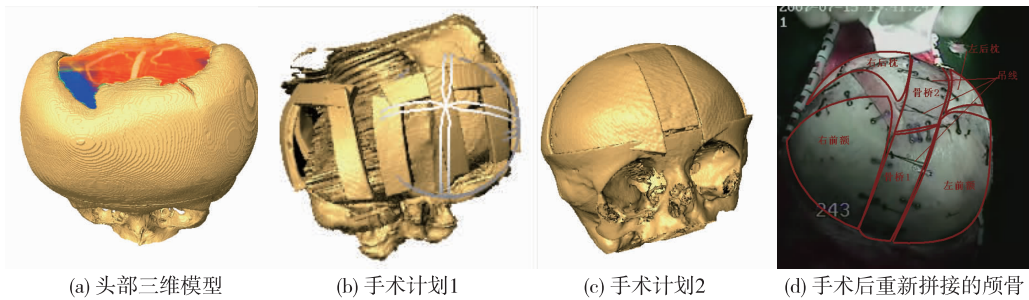


图 3 颅骨拼接手术计划
Fig. 3 Surgical plan of braincase

表 2 有限元模型中相关结构的材料参数

结构	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	1.6	10000	0.29
松质骨	1.1	450	0.29
韧带	1.0	20	0.30
关节囊	1.0	10	0.30

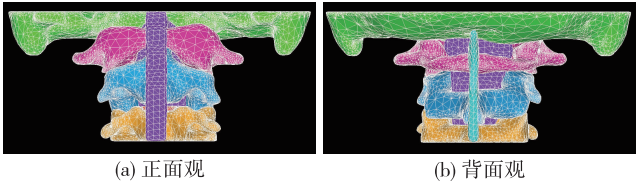


图 4 寰枢关节模型正面观和背面观

Fig. 4 Positive and dorsal view of the model of atlantoaxial joint

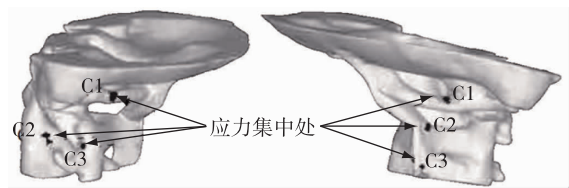


图 5 寰枢关节受力分布

Fig. 5 Force distribution of atlantoaxial joint

齿突和棘突以及 C3 棘突,与实际经验数据相一致.随着载荷的加大旋转角度、错位关节面加大,最大受力部位没有改变.使用数字医学的方法对寰枢关节进行受力

分析为研究脱位的形成机理及手术计划设计提供理论依据.

4 结 论

数字骨科医学遵循精准手术理念和技术体系,通过精确术前评估,精密手术规划,精工手术作业,精良术后处理,达到最佳治疗效果.它与传统经验骨科医学手术相比,具备多方面的优越性,包括精准性、安全性、预知性和可重复性.利用数字骨科医学在术前设计手术方案,择优模拟实施,预测术后效果,选择最佳方案实施,可最大限度避免医源性失误.随着现代医学和计算机学科的更加密切结合与发展,数字医学必将在各种疑难病症的治疗中得到更加广泛的应用.

参考文献:

[1] 沈毅. 基于 CT 数据的肝脏及其管道可视化与虚拟手术研究[D]. 厦门:厦门大学,2005.

[2] 陈昱. 基于临床 CT 数据的虚拟肝脏及手术计划系统关键技术研究[D]. 厦门:厦门大学,2006.

[3] 郑朝炜,王博亮,戴培山,等. 基于 VTK 的鼻咽部组织三维重建[J]. 中华现代影像学杂志,2006,3(9):805-808.

[4] 鲍春波,王博亮,刘卓,等. 一种用于软组织变形仿真的动态质点弹簧模型[J]. 系统仿真学报,2006,18(4):847-851,855.

[5] 李景欣. 计算机辅助设计在强直性脊柱炎胸腰椎后凸畸形矫形手术中的应用[D]. 广州:南方医科大学,2008.

Research on Applied Digital Medicine to Precision Orthopaedic Surgery

WANG Bo-liang^{1*},CAI Ming¹,GUO Xiao-xi¹,DUAN Shao-yin²,
SONG Xiao¹,HUANG Shao-hui¹

(1. School of Information Science and Engineering,Xiamen University,
2. Zhongshan Hospital,Xiamen University,Xiamen 361005,China)

Abstract: The integration of modern orthopedic medicine and computer science promote the development of digital orthopedic medicine. Digital orthopedic medicine applies three-dimensional image processing technology and a variety of digital image processing to display the pathological changes position of patient's bone. Preoperative surgical planning and predict the postoperative results can be designed with this technology,which is more accurate than traditional surgical methods. This paper presents three typical surgery cases of digital orthopedic medicine completed by our laboratory.

Key words: digital orthopedic medicine;image processing;surgical planning