

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.008

基于逆向技术的骨盆环三维重构与结构分析*

田卫军^{1,2}, 李 郁²

(1. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学明德学院 机电工程系, 陕西 西安 710124)

摘要:为解决骨科生物力学中医学影像数据逆向重构的技术问题,利用三维工程设计软件与有限元软件之间的接口技术,将逆向工程技术与有限元技术应用到人体骨盆环的三维重构设计当中,并开展了正常骨盆环在垂直载荷作用下静力学分析,建立了静载作用下应力和位移之间的云图分布关系,提出了人体骨骼逆向重构的一般性方法与关键技术,在生物力学基础上对重构模型进行了评价。研究表明,给出的人体骨骼模型逆向重构方法正确、可行;建立的骨盆有限元模型在模拟人体正常生理作用下的承载情况与理论认识和实验研究结果相符,其分析结果可以为后期医学工程分析与医疗器械设计提供依据。

关键词: 骨盆环; 逆向工程; 三维重构; 结构分析

中图分类号: TH164; R318; TP391 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-0997-05

Three-dimensional model reconstruct and finite element analyses of pelvic ring based on reverse engineering technology

TIAN Wei-jun^{1,2}, LI Yu²

(1. School of Electrical Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University Ming De College, Xi'an 710124, China)

Abstract: In order to solve the problems of reconstruction techniques of orthopedic biomechanics medical imaging data, reverse engineering technology and finite element technology for three-dimensional reconstruction of human pelvic ring were investigated by using the interface technology between the 3D software and finite element software. After the static analysis of the normal pelvis under the action of a vertical load, the cloud distribution of stress and displacement was established. A method and key technologies were presented to human body skeleton model of three-dimensional reconstruction. The model of reconstruction was evaluated on the base of orthopedic biomechanics medical. The results show that the model reconstruction method of human body skeleton is correct and feasible. It is consistent with the finite element model analysis results and theoretical knowledge and experimental results under normal physiological action of simulated human carrying case. It can provide the basis for later medical engineering analysis and medical equipment design.

Key words: pelvic ring; reverse engineering; three-dimensional reconstruction; structural analysis

0 引 言

自20世纪70年代以来,在现代生物力学之父美籍华人冯元桢先生的推动下,骨生物力学作为一门新兴的边缘学科开始在中国起步并不断得到发展。目

前,关于骨生物力学研究主要集中在脊柱、四肢的长骨、骨盆等方面。其中,脊柱是在生物力学中最早采用有限元分析技术的部位,也是分析得最多、相对比较成熟且在临床上应用最为广泛的^[1]。随着有限元软件技术的不断完善,现在的有限元模型已经可以形象

收稿日期: 2014-03-21

基金项目: 西北工业大学明德学院“青年科研基金”资助项目(MDJ201106)

作者简介: 田卫军(1978-),男,陕西凤翔人,博士研究生,讲师,主要从事CAD/CAM应用技术方面的研究。E-mail: tianwj@npumd.cn

地、逼真地模拟椎间盘、韧带、肌肉等组织结构,其分析结果对于损伤的危险性预报以及医疗器械力学性能评价及优化设计都起到了积极作用^[2]。

随着计算机技术的飞速发展促进了先进制造技术在制造业的巨大进步,而作为先进制造技术之一的逆向工程技术,其优势也在医学上引起了人们的普遍关注。伴随着生物材料技术和医学影像技术的发展,医学图像的三维模型逆向重构已经成为目前医学影像处理技术中的一个热点问题,而逆向反求技术正是解决这一问题的优选方法。逆向工程RE技术就是将实物转换为CAD模型的相关数字化技术、几何模型重建技术以及产品制造技术的总称。在这项技术中,模型的重建部分是其关键技术之一。目前逆向工程技术已经被广泛应用在工业设计中,而在医学上应用主要集中在以下3个方面:①可植入假体的个性化设计与制作;②手术辅助介入性治疗;③人体骨生物力学特性分析与研究^[3]。

本研究通过对人体骨盆环的三维逆向重构和力学分析研究,为人体骨关节的重构及力学分析提供一种设计途径,对人体仿生、运动功能修复、医疗器械设计等都有重要意义。

1 骨骼逆向重构一般设计流程

逆向工程技术中的核心技术就是实现曲面的重构技术,而目前逆向技术发展到今天,关于曲面重构主要方法有:参数化曲面、网格化曲面、基于变形的曲面、细分曲面、隐式曲面、基于神经网络的曲面重构等。在工业CAD/CAM系统及逆向工程软件中常采用NURBS曲面、B样条曲面、Coons昆氏曲面等参数化曲面,其关键技术都是基于矩形域的曲面重构。而在这些曲面重构技术中,由于NURBS曲面具有精度高、自由、灵活、高效和简洁等特点,其被作为产品外形几何定义中,描述产品几何形状的惟一可行方法^[4-5]。本研究采用的Geomagic逆向软件是基于NURBS曲面的重构技术。

人体骨骼模型重构主要面对的是个体化假体制作、骨生物力学分析、手术方案模拟的新技术,它的应用与研究内容均是以骨骼的三维数字化模型为基础。分析人体骨骼的特点可知:其一般均为不规则的复杂曲面,因此重构过程相对比较困难。针对这一结构特点,本研究给出了以下逆向重构技术方案,技术路线如图1所示。

(1) 第一种重构设计方案。该方案采用快速成型技术,主要用于骨骼重建、人工假体、医学模型分析

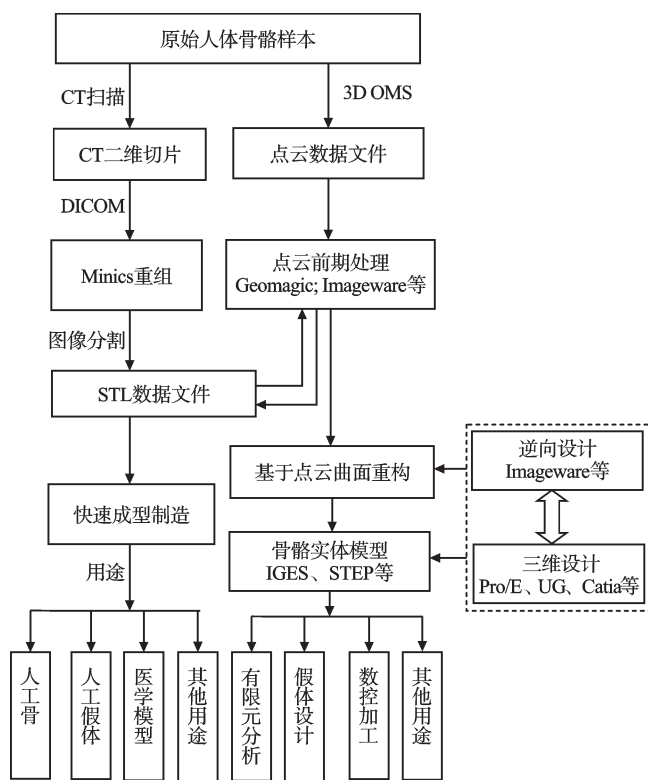


图1 人体骨骼逆向重构基本流程

等。首先,利用CT机进行骨骼扫描得到骨骼部位CT图像并以DICOM格式进行存储,然后导入到Mimics软件中,利用图像识别与分割技术将软组织与骨骼进行人工干预分离,从而得到骨骼部分。最后把分离的骨骼切片进行堆叠,即可生成STL三维模型,最后以STL格式进行输出。当然,如果STL模型存在原始的模型缺陷,研究人员可进一步在Geomagic或Imageware等逆向软件下对STL文件进行局部修复,最后将模型文件以STL格式导入到快速成型机中进行快速原型制造,还原出骨骼模型的原型。当然,针对不同用途的成型材料及成型方法也有所差异。

(2) 第二种重构设计方案。该方案利用CT图像在Mimics中还原出骨骼的STL数据,并通过点云处理软件接口,原样输出IGES图形数据文件。此时,数据格式为点云数据文件。或直接利用三维扫描技术对已有原型骨模型进行三维扫描得到点云数据文件,然后利用逆向工程相关重构技术进行模型的反求重构。在这里点云文件可以利用Geomagic或者Imageware软件进行处理,最后将其转换为NURBS曲面模型。曲面模型输出时仍然以IGES或STEP格式输出,这样可以直接导入到工业设计软件Pro/E、UG、Catia等三维正向设计软件中进行曲面相关操作,例如:利用缝合、实体化及加厚等技术还原出骨骼的实体CAD模型,从而进行快速成型,或者以还原的骨骼模型为参

考进行假体关节零部件设计与结构分析。

在这两种设计方案中,选择哪一种设计方法要视模型的结构特点、使用用途及设计者的熟练程度来合理进行选择。本研究的重构设计过程采用第二种设计方案。

2 面向骨盆环三维模型逆向重构

骨盆环是由左、右髌骨和骶、尾骨以及其间的骨质连接构成。研究人员首先使用CT进行扫描,采集了成人骨盆部位的CT数据,并以DICOM格式存储,利用医学Mimics软件导入到相应设计环境中进行区域识别与划分,扫描的CT数据一般为灰度图像,其中包括软组织和骨组织区域结构,其中每一点的灰度值反映了该处的密度分布^[6],利用灰度的这一特性即可以进行不同区域组织结构的图像识别。骨骼的灰度值因个体差异而有所不同,数值一般分布在300~1500范围内。通过人为干预和调整,利用阈值分割、边缘提取及处理技术就可将骨骼和软组织轻易地分离开,从而获取原始模型。在Mimics设计环境下进行骨盆重建,一般需要经过“数据预处理—区域识别与分割—边缘提取与细化—区域生长”等操作过程,即可得到骨盆区域的STL模型。最后,再导入到逆向工程软件Geomagic环境下进行光顺处理提升模型质量,Geomagic模型处理一般经过“点云阶段→多边形阶段→曲面阶段→CAD阶段”4个阶段就可以实现对模型的光顺处理和模型重构,处理流程如图2所示^[7]。

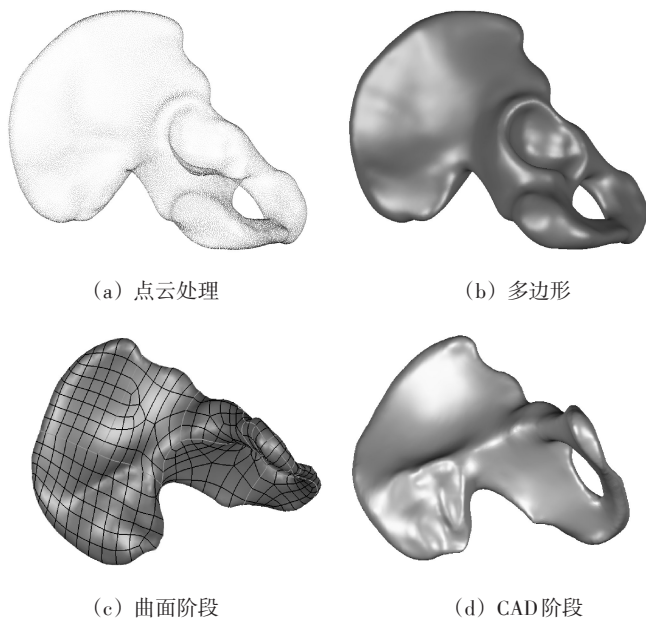


图2 骨盆环Geomagic处理流程

在点云和多边形阶段时,由于骨盆在扫描过程中,不可避免地受到扫描技术的限制以及扫描环境的

影响或多或少会带来一些多余数据点或者噪点。此时,研究人员可以通过Geomagic中点处理命令,例如使用“体外孤点”或“非连接项”等操作实现对多余点或者噪点的剔除。然后,对点云数据进行统一采样即可获得保持原型的一定量的数据点,点云处理阶段如图2(a)所示。点处理完后,通过对点云进行封装,经过三角化处理即可进入到多边形设计阶段,多边形阶段是由大量点与点之间拼接的三角形组成。三角形在构成时,往往由于点云中存在的一些多余点、错误点或表达不准确的点,造成三角形构成的不合理,因此对于这种三角形必须进行剔除或编辑处理。区域较小地方的三角形可以通过“清除”、“消除钉状物”等操作进行局部细化,从而使骨盆的模型表面变得更加光滑柔顺,最后再利用“简化”命令减少三角形数目压缩数据,多边形阶段如图2(b)所示。

骨盆环模型与其他机械零件模型相比,具有曲面结构复杂、细节特征丰富等特征。尤其是髌骨特征,进入形状模块后,首先通过“探测曲率”操作提取表面的轮廓线,结果如图2(c)所示。其中网格线即为主曲率线,曲线是骨盆的轮廓线。往往软件自动提取的轮廓线并不完全是我们所设想需要的,所以还必须人工干预调整;其次,通过对轮廓线“升级/约束”等操作,逐步获得理想的轮廓线;然后,利用“构造曲面片”操作,在轮廓线内实现曲面网格划分、利用“移动面板”操作逐步使曲面网格变得更加合理、均匀;最后通过“构造格栅”以及“拟合NURBS”曲面等操作,即可得到的CAD模型如图2(d)所示。本研究将CAD模型导出为IGES文件,即可在Pro/E环境下针对病人个体情况进一步进行装配设计和详细结构设计。骨盆环三维重构与结构设计如图3所示,某病人右髌关节病变,进行了截切手术,根据生理功能需求,本研究进行了假体关节的零部件详细设计。

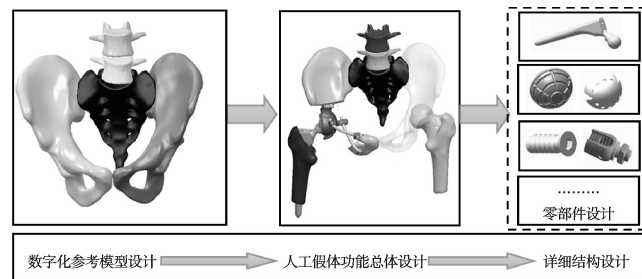


图3 骨盆环三维重构与结构设计

在上述重构过程中需要注意几个关键点:在CT数据导入到Mimics时,由于CT阈值的个体差别,会造成骨关节在生长时会有很多空洞,这对于后期有限元分析会造成很大麻烦,需要将每幅CT图片进行比照

和修改,尽量把骨关节中间有空洞的地方填满;通过阈值来提取相应的组织时,如果阈值设置过低会引入噪点,设置过高则会丢失组织,因此阈值设置要合理,提取像素要善于利用蒙罩功能进行编辑管理;在后期有限元分析时,由于生物结构材质分布不均一,同时各种材质的分布界限是非线性的,所以后期还原后的模型并非直接导入到ANSYS有限元中,而是利用Mimics载入体网格数据后,针对网格的每一个单元计算出亨氏单位的灰度值,根据不同的灰度范围定义相应的材料最后输出。

研究人员在导入到Geomagic进行处理时,多边形阶段,不要过分调整松弛量,否则会出现变样,也不要在此阶段多做操作改动,否则会改变并降低点的位置精度,造成在分析中超差;在网格处理时,在结构网格中的分辨率应该设置在50%以上,这样才能保证精度,又有比较光滑;在NURBS曲面阶段,通过分析中的检测功能可以对曲面质量进行分析,如果要得到比较光滑的面,此时可以局部利用松弛功能进行调整;最后,曲面片的划分是做好曲面的关键,曲面片划分时,不能划分得太小,否则碎面片过多,但是也不能分得过大,过大将会造成点云形状失真。所以在处理时其基本原则是:①每块曲面片的曲率变化尽量平滑与均匀,这样拟合曲面时就能够更好地捕捉到点云的外形,降低拟合误差;②每块曲面片尽量保持为四边形曲面^[8]。

3 骨盆环有限元模型建立

本研究将骨盆环模型各部分的几何模型导入到有限元分析软件ANSYS中。通过对骨盆进行静态有限元分析,模拟人体正常站立时骨盆上的应力分布状况及位移变化情况,即可利用上述分析结果为该部位生物力学和病理状况的研究提供依据。

网格划分时设定骶髂关节为C3D10M单元,划分网格节点数为79 005,单元数为31 621,椎体与椎间盘、耻骨联合处以及小关节之间为GLUE连接,利用弹簧单元连接双侧骶髂关节,以模拟关节软骨及韧带对骶髂关节的制约,共建立26个弹簧单元,同时保留骨关节的正常活动。边界条件及载荷设置,按照正常站立时一般情况进行分析,对双侧髋臼进行自由度约束,限制 X 、 Y 、 Z 3个方向的位移及旋转自由度。本研究的骨骼材料近似看作为各向同性材料,继承Mimics材料属性,材料属性设置如表1所示^[9]。根据Hugate等的生物力学实验,对完整骨骼模型垂直施加3 000 N正向载荷^[10],刚度设为600 N/mm,所建立的有限元模型如图4所示。

表1 骨质材料属性

项目	纤维环	髓核	皮质骨	松质骨
杨氏模量/MPa	4.2	1 667	12 000	100
泊松比	0.45	0.48	0.3	0.2

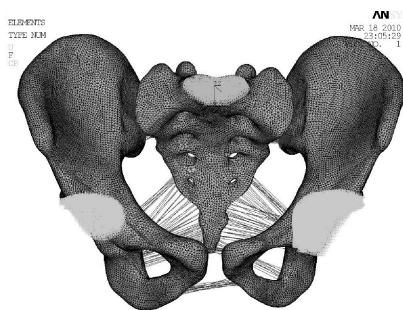


图4 骨盆有限元模型

4 结果分析

本研究在骨盆环上添加 $F=3\ 000\text{ N}$ 垂直载荷,该载荷直接作用于骶骨刚性表面上,模拟人体站立时生理特征。通过后置处理提取的应力分析结果如图5所示。



图5 骨盆垂直载荷下应力云图

由图5所示的应力云图分布可知:在垂直载荷作用下应力主要集中在髂骨的两侧,应力分布趋势一致且对称;应力主要经髂骨翼向骶髂关节的斜下方传递;其分布状态以坐骨大切迹附近呈弯弓状分布最后向两侧髋臼传递。从数值分布上可知骶髂关节所受应力最大,其值为 $2.06 \times 10^7\text{ Pa}$,而在骨盆前环即耻骨支和耻骨联合处应力数值分布最小。通过以上分析结果可知:骨盆环主要位于后方部位起到承载和稳定作用,前方结构功能以支撑为主,分析结果符合人体生理特征。

通过后置处理提取的位移分析结果如图6所示。由图6所示的位移云图分布显示可知:在垂直载荷作用下骨盆位移呈现波浪状分布。位移以骶骨为中心,沿着水平向外辐射传递,且位移呈现出向外逐渐依次

减弱;其次,从位移数值分布也可以看出,对于骨盆环在垂直加载作用时,骶骨背侧的骶正中嵴处的位移量最大,绝对值最大值为0.897 mm,位移向两侧扩散直至到达髂骨翼部分开始出现逐渐减弱,而前方的耻骨联合处位移最小,基本可以忽略不计。其分析结果和应力分析结果一致。



图6 骨盆垂直载荷下位移云图

髋关节截切时,切位可以采用低位、中位、高位截切形式,骨盆右髋关节切位示意图如图7所示。但是针对该病人个体具体情况,由有限元分析结果可以看出,应力和位移主要在髂骨翼部分,靠后变形和应力开始减弱,因此采用中、低位截切形式更合理。

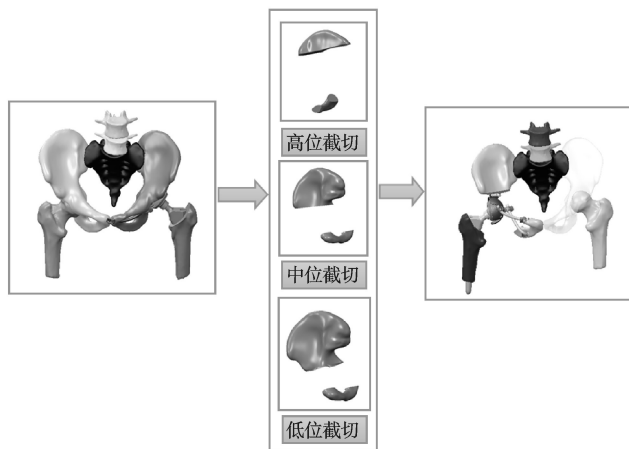


图7 骨盆右髋关节切位示意图

5 结束语

逆向工程在医学上的应用是一门医工结合的边缘性学科,它不仅涉及到机械工程、生物工程、材料科

学,还和医学工程紧密结合。而采用逆向工程技术与有限元法结合的方法正是这种边缘学科中一种新兴的研究手段。因此,建立骨盆的有限元模型对于人体骨骼的重建方式与评估都具有重要的现实意义。

本研究以人体骨骼骨盆环的逆向重构过程给出了目前医学图像处理与模型逆向重构实现的一般性方法与骨骼逆向重构处理的一些关键技术。最后,通过有限元法进行了个体骨盆环的结构生理特性分析,其分析结果与理论认识和已有的实验^[11-12]研究结果相符,表明所建立的有限元模型有效、可靠,并利用有限元分析结果进行了后期个体假体结构件设计与医学工程分析。

参考文献(References):

- [1] 欧阳钧. 骨科生物力学技术的发展及应用[J]. 解剖学杂志, 2011, 34(6): 733-735.
- [2] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.
- [3] 黄艳华, 孙文磊, 姜宏. 基于逆向工程技术的人体骨骼模型重建技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(11): 168-170.
- [4] 金涛, 童水光. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 高永祥. 基于逆向工程技术对摩托车后视镜模具的建模及数控加工[J]. 轻工机械, 2013, 31(4): 99-102.
- [6] 何亚奇, 张雪林, 唐秉航, 等. 髋骨术后仿真生物力学分析与临床研究[J]. 现代生物医学进展, 2012, 12(34): 6705-6709.
- [7] 黄曼慧, 成思源. 基于Geomagic的CAD模型重建技术研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 106-108.
- [8] 王慧敏. 反向工程中NURBS曲面CAD重构技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(10): 81-83, 238.
- [9] 肖进, 尹庆水, 张美超, 等. 垂直载荷作用下骨盆的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 39(12): 7165-7169.
- [10] 李全, 张治宇, 郑龙坡, 等. 骶骨次全切除术后骨盆有限元模型的建立及验证[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 44(12): 8649-8652.
- [11] 原林, 高梁斌. 骨盆的解剖和生物力学[J]. 中国创伤骨科杂志, 2001, 3(2): 144-145.
- [12] 郭磊, 赵玉岩, 范广宇, 等. 垂直应力影响骨盆环应力分布的实验研究[J]. 中国医科大学学报, 2002, 31(3): 195-196.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

田卫军, 李郁. 基于逆向技术的骨盆环三维重构与结构分析[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 997-1001.

TIAN Wei-jun, LI Yu. Three-dimensional model reconstruct and finite element analyses of pelvic ring based on reverse engineering technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 997-1001.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>