

基于 CT 图像反求技术的人体股骨头修复建模

宋卫卫^{1,2}, 苏铁明¹, 欧宗璞^{*1}, 赵德伟³, 王卫明³, 韩 军⁴

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022;
3. 大连大学 附属中山医院, 辽宁 大连 116001;
4. 大连现代高技术公司, 辽宁 大连 116024)

摘要:提出了一种基于 CT 图像反求技术的髋关节建模和缺损股骨头修复建模的新方法. 利用基于模型的分割方法从人体髋关节 CT 图像中分别提取股骨和髌臼骨轮廓三维点数据, 通过对离散点云数据进行规则化处理、精简、分割等, 提取目标区域点云数据, 最后利用最小二乘法拟合对因病变而发生塌陷的股骨头表面进行修复重建, 恢复其健康状态的球面形态特征. 利用两例不同程度的股骨头坏死病例进行修复实验, 均得到较精确的修复还原效果. 该方法不仅可以很好地重构人体髋关节模型、还原缺损股骨头的原始形态, 而且可以推广到其他关节或骨组织, 为骨科手术的精确定位和生物力学有限元分析提供了理论模型, 并为关节假体的个性化快速制造提供了一种有效的方法.

关键词:髋关节; 股骨头修复重建; CT 图像; 反求技术

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

0 引言

股骨头是人体髋关节解剖结构中最重要的一部分, 股骨头缺血性坏死 (avascular necrosis of femoral head, ANFH) 是骨科领域至今尚未解决的疑难疾病, 高发人群为青壮年, 发病率较高, 特别是近年来发病率呈明显上升趋势, 因此对股骨头坏死疾病的治疗和研究具有非常重要的意义. 人工关节置换术作为一项成熟和经典的骨科治疗技术已经在髋关节疾病的治疗中取得了很大成功, 被认为是治疗老年中晚期股骨头坏死最有效的方法. 但对于青壮年患者的治疗方法则争议较大, 很多专家更倾向于采用保留股骨头和尽量推迟关节置换时间的治疗方案^[1,2]. 这是因为中青年活动量大, 关节置换后容易出现关节脱位、假体松动等并发症, 不得不进行一次或多次的关节翻修手术, 给患者带来巨大的精神压力和经济负担, 因此, 保留股骨头治疗股骨头坏死一直是

国内外医学界研究的热点问题, 目前已取得很大进展^[3,4], 如采用骨组织移植等方法不仅能够重建股骨头形态, 而且可最大程度地保证关节的生理机能. 但从愈后效果来看, 无论是关节置换还是股骨头修复手术, 除手术过程中的技术因素以外, 影响髋关节功能恢复最重要的因素之一是对病变股骨头形态的恢复程度. 而目前的股骨头修复手术仅凭医师的主观判断, 人工假体也多是批量生产, 很难与病人自身的关节相匹配, 在一定程度上影响了手术的精确性. 因此, 根据患者自身的髋关节参数, 将股骨头坏死缺损部分修复还原为健康状态下的股骨头模型, 对指导个体化假体设计、股骨头修复手术模拟和导航等都具有重要意义.

目前这方面的研究还刚刚起步, 大多数研究工作面向于髋关节假体的设计与制作方法和手术中的技术问题, 专门针对缺损股骨头的修复建模方法还未查到相关文献. 本课题组在前期工作中已对图像分割和目标点的采样问题进行了研

收稿日期: 2007-03-04; 修回日期: 2009-01-04.

基金项目: “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目 (863-306-ZD13-03-6); 大连市科技局资助项目 (2005E21SF134).

作者简介: 宋卫卫 (1968-), 女, 博士生; 欧宗璞* (1936-), 男, 教授, 博士生导师; 赵德伟 (1955-), 男, 主任医师, 教授, 博士生导师.

究^[5,6]. 本文在此基础上提出一种基于 CT 图像反求技术, 利用病人自身髋关节数据修复重建坏死股骨头的新方法, 即利用反求工程技术, 通过曲面拟合的方法修复重建缺损股骨头。

为表达方便, 本文将髋关节或股骨头的“模型重建”简称为建模, 文中所涉及到的“模型”, 皆指关节或骨骼的表面形态模型。

1 髋关节三维形态模型建立流程

整个髋关节建模的系统框架如图 1 所示, 其中图像预处理、图像分割等问题另有文章阐述, 本文主要从点云数据处理入手, 探讨基于点云数据的曲面重构方法, 以及利用该方法解决髋关节建模、缺损股骨头修复重建等问题。

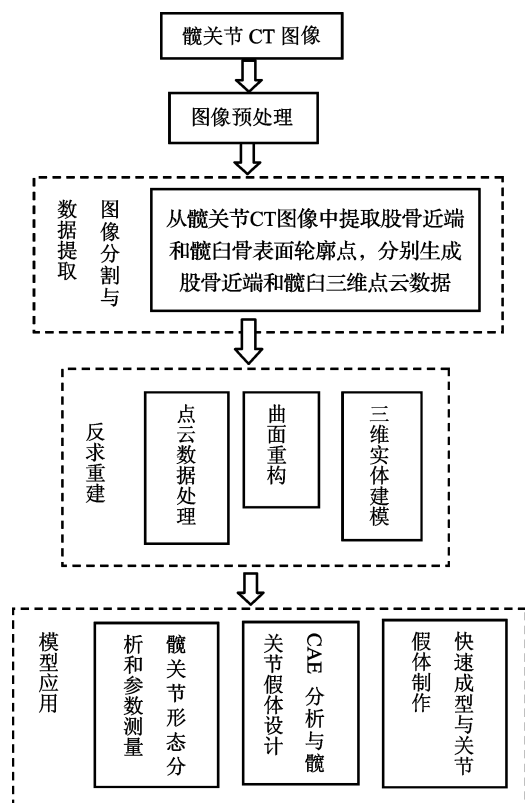


图 1 髋关节反求建模流程图

Fig. 1 The flow chart of modeling for hip joints

2 CT 图像处理及目标轮廓点数据获取

2.1 髋关节 CT 图像

CT 是骨科辅助诊断的一种有效手段, 本文使用的 CT 图像是大连大学附属中山医院提供的 DICOM 格式的人体髋关节螺旋 CT 图像, 分辨率为 512×512 , 层间距为 $0.4 \sim 1.0$ mm。

2.2 图像去噪和感兴趣区域提取

CT 机在扫描成像过程中通常会产生一些噪声, 使图像质量下降, 对后续的图像分割、重建等效果造成影响, 所以需要对断层图像进行滤波处理。另外, 如图 2(a) 所示, 髋关节 CT 图像中除骨质组织以外, 还包括大量的肌肉、表皮等软组织以及背景, 而本文需要处理的感兴趣区域 (region of interest, ROI) 只是股骨和髋臼骨部分。因此, 为了减小数据量, 提高数据处理速度, 从髋关节 CT 图像中提取图 2(b) 所示左、右髋关节 ROI。在后续的图像分割及对股骨头重建过程中只需对提取的 ROI 数据进行操作即可, 可大大提高处理速度。

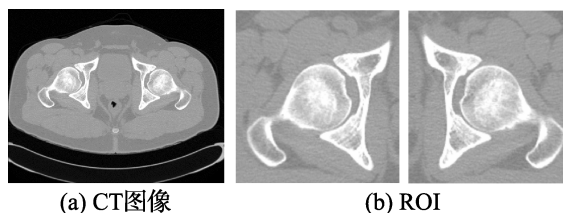


图 2 髋关节 CT 图像及 ROI

Fig. 2 CT images and ROI of hip joints

2.3 股骨和髋臼轮廓数据点提取

股骨头修复手术或假体设计所关注的只是髋关节接合区股骨头的形态, 因而需要将股骨和髋臼彼此分离。如图 2(b) 所示, 由于这两部分骨骼间距很小, 其分割问题至今仍没得到很好的解决。传统的阈值法只能从 CT 图像中分离出骨组织, 但对于相邻骨骼的分割则显得力不从心。一些文献中提出利用多种图像分割技术相结合的混合分割方法, 在一定条件下得到了较好的分割结果, 但分割过程过于烦琐, 可操作性不强。本文采用基于统计模型的方法^[6], 成功地分离出了股骨头和髋臼, 使后续的相关操作成为可能。利用该方法可以根据后续曲面建模的需要以轮廓特征点的形式记录目标的各断层轮廓, 得到相应的三维点云数据 (图 3 所示)。

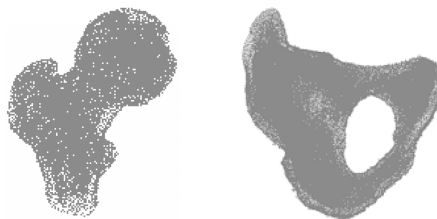


图 3 股骨和髋臼的离散点云数据

Fig. 3 The scattered cloud points of femur and acetabulum

3 基于反求工程技术的髌关节建模

三维点云数据得到后,根据需要一般可采取直接插值法和曲面重构法两种建模方法^[7].其中,直接插值法避免了构造 NURBS 曲面过程中人机交互的大量工作,具有数据处理时间短和效率高的优点;而曲面重构法的优点则在于可方便地对数据进行三维 CAD 模型的设计和生物力学分析,适应人工骨骼的快速成型制造.

3.1 点云数据处理

由于点云处于一种离散状态,不利于曲面重建过程中数据点的遍历和邻域搜索等操作,需要利用一定的数据结构将其规则化.另外,从图3中可以看出,表示股骨和髌臼骨三维形态的点云数据量非常大,所包含的数据点分别为 559 816 和 175 114,其中包含大量的噪声和冗余,如果直接利用这些数据点进行曲面重构或三角网格化,不但会过多增加计算机的处理时间,而且会影响重构曲面的光滑性.所以,应该在保持被扫描对象所需信息的情况下对点云数据进行最大程度的简化.目前,有关点云精简的方法很多,如包围盒法、平均点距离法、基于曲率的精简方法和三维栅格细分法等^[8,9].曲率是反映曲面性质的重要特征,以曲率为准则的简化算法,能够在对点云数据精简的同时保持模型的特征,模型的绘制效率较高,大多数分片技术都采用点云上每个点的曲率作为曲面特征识别的重要依据.由股骨和髌臼骨的解剖结构可知,骨骼表面由曲面构成,而且股骨头和髌臼月状面处还可近似为圆球面,所以比较适合采用曲率精简方法.

本文结合面向快速制造的实体模型构建的需要,引入一种新型编码的八叉树结构对点云数据进行规则化表示并对数据进行初步压缩,提出一种适合于髌关节中骨骼结构特征的数据精简方法.该方法首先利用八叉树建立散乱点的空间拓扑关系,根据点云的密集程度,选定适当的空间分辨率,实现点云的初步缩减;然后利用最小二乘球拟合法进行点云的曲率估算;最后,确定精简原则,在保证曲面特征的情况下对点云进一步精简.

(1) 点云数据的八叉树表示与初步缩减

首先对点云进行标准化处理,生成点云数据的最小正立方体包围盒,以股骨点云数据为例,原数据量为 559 816,经标准化后用深度为 7 层的八

叉树结构表示,数据空间大小为 $2^7 \times 2^7 \times 2^7$,将空间分辨率设为 2^1 ,即以上层节点代替叶节点,则八叉树深度变为 6 层,数据量变为 $2^6 \times 2^6 \times 2^6$,即 262 144,为原始数据量 559 816 的 46.8%,实现了对数据的初步缩减.

(2) 利用最小二乘球拟合法估算点的曲率

本文研究的主要对象是股骨头和髌臼部分,从其解剖结构得知,这两部分皆近似为球面,为了更好地保留其原始形态,采用最小二乘球拟合法来估算曲率.

设 $P(x, y, z)$ 为球面上一点,则球面方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (1)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 为球心, r 为球半径. 则式(1)展开为

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 - 2x_0x - 2y_0y - 2z_0z + \\ x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

令 $a = -2x_0, b = -2y_0, c = -2z_0, d = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2$, 则式(2)可表示为

$$x^2 + y^2 + z^2 + ax + by + cz + d = 0 \quad (3)$$

只要求出参数 a, b, c, d , 即可得到球心坐标和半径.

设点云中一点 (X_i, Y_i, Z_i) 中点到球心的距离为 $d_i (i = 1, 2, \dots, N)$,

$$d_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 \quad (4)$$

其与球半径的平方之差

$$\begin{aligned} \delta_i = d_i^2 - r^2 = (x_i - x_0)^2 + \\ (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2 = \\ x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 + ax_i + by_i + cz_i + d \end{aligned} \quad (5)$$

令 $Q(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^N \delta_i^2$, 式(5)可表示为最小二乘目标函数形式:

$$\begin{aligned} Q(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 + ax_i + \\ by_i + cz_i + d)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

求参数 a, b, c, d , 使得 $Q(a, b, c, d)$ 的值最小.

以点 P 为原点建立局部坐标系, 坐标轴的方向与世界坐标系保持一致, 这样只需要对 P 点及其邻域点作平移变换即可得到其在局部坐标系下的坐标值, 求得参数 a, b, c, d , 然后由 a, b, c 得到球心坐标值 (x_0, y_0, z_0) , 最后求出点 P 的曲率:

$$\rho = 1 / \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d} \quad (7)$$

按以上步骤求出所有点的曲率后,计算出点云的平均曲率。

(3) 根据曲率精简原则进一步精简点云

由第(2)步中的曲面拟合过程可知,点与其邻域点的曲率变化较小,精简时可根据简化要求,首先求取某点 P 及其 k 个邻域点的局部平均曲率,然后将局部平均曲率与点云的全局曲率相比较,如果局部曲率小,说明该区域较平坦,则保留 P 点而将其邻域点删除;若局部曲率大,说明该区域较陡峭,则保留所有曲率大于全局曲率的点。这样可在曲率小的地方保留少量点,而在曲率大的地方保留足够多的点,从而在保证曲面特征的前提下,有效减少点云数量。 k 值不同则点云的简化程度不同,应用时可根据不同需要选择适当的 k 值。

(4) 点云精简结果及分析

按上述精简方法对图3中的密集点云数据进行处理,得到图4中的点云数据,其中,股骨点云数据由559 816精简到11 443,为原数据的2%,髌臼骨点云数据由175 114精简到5 150,为原数据的3%,有效地缩减了点云数据量;同时从图中可以看出,精简后的点云较好地显示出骨骼的形态特征和几何特性,其特征表现能力远远高于原始密集点云数据。

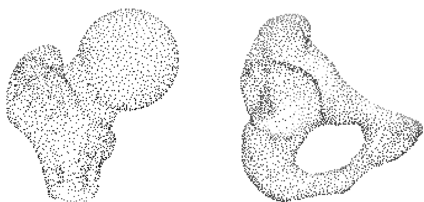


图4 精简后的股骨和髌臼骨点云

Fig. 4 The point cloud of femur and acetabulum bone after reduction

3.2 基于点云数据的曲面重构与仿真分析

(1) 股骨头和髌臼月状面球面拟合

由髌关节的解剖结构可知,股骨头表面和髌臼月状面都为球面,根据这一特征,利用最小二乘法直接对股骨头部分和髌臼部分点云进行圆球面拟合,分别重建出股骨头表面和髌臼月状面。由于在点云数据处理过程中已经利用最小二乘球拟合法对点云数据进行了精简,由精简后的点云很容易拟合出这两部分的球面特征。

图5所示为提取的股骨头部分和髌臼部分点云利用最小二乘球拟合法拟合出的圆球面。由分

析拟合的球面参数可以发现,两球心位置三方向坐标值最大距离不超过0.5 mm,两球心基本重合;半径值之差为2.4~5.0 mm,与股骨头和髌臼间关节软骨的厚度相当^[10],拟合模型参数与髌关节解剖结构参数相符,从而验证了该方法的可行性与准确性。

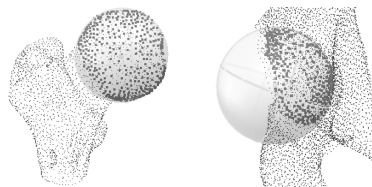


图5 股骨头和髌臼月状面的球面拟合

Fig. 5 Fitting the geometrical shape of femoral head and acetabulum using sphere

(2) 股骨近端和髌臼骨完整曲面模型建立

髌关节各部分结构中,除股骨头和髌臼部为近似圆球以外,其他部分由非规则曲面组成。因点云数据已在上步中得以精简,这里直接对髌关节中除股骨头和髌臼部分的其他点云做三角剖分,生成三角剖分网格面,再用NURBS曲面拟合出股骨和髌臼骨曲面模型,如图6所示,自左至右分别为股骨模型的前面观、后面观和髌臼模型。



图6 股骨和髌臼曲面重构后的模型

Fig. 6 The modeling of femur and acetabulum bone

(3) 仿真分析

为了验证模型的准确性,将股骨和髌臼进行仿真装配,得到图7所示的髌关节仿真模型,通过模拟髌关节的运动状态,观察股骨头和髌臼之间的配合情况,仿真结果表明股骨头与髌臼窝配合良好。

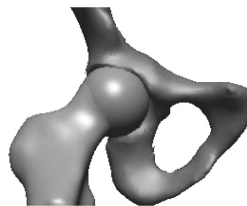


图7 髌关节表面模型

Fig. 7 The model of hip joint

为进一步验证模型的准确性,将曲面重构的股骨模型与图8所示的直接由断层图像重建的原始形态模型进行叠加,以分析模型间的偏差,结果如图9所示,左侧彩色条形图中颜色由蓝到红(自下而上)表示误差由小到大,图中显示平均误差为0.27 mm,两模型的匹配率为98.98%。从图9右侧所示的模型匹配图可以观察到,两模型基本重叠,无论是形状还是位置都有较高的匹配度,只在股骨头后部左侧有一个未重叠区域,而此处正好是正常股骨解剖结构中的股骨头凹所在的位置(图8),从临床股骨头修复手术得知,没有这个凹陷并不影响关节的功能。由此可见,本文提出的方法能够很好地重建髋关节骨骼的形态模型。

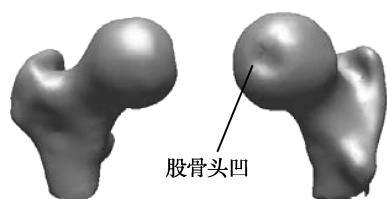


图8 直接由断层轮廓数据重建的股骨原始形态模型

Fig. 8 The model of proximal femur by Marching Cube

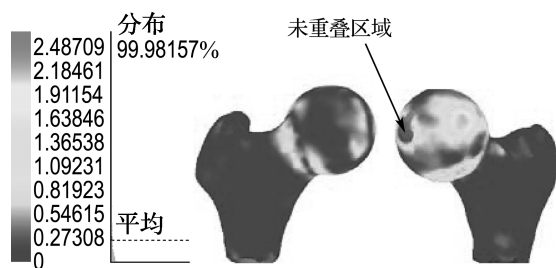


图9 误差分析示意图

Fig. 9 Deviation analyses between two models

3.3 病变股骨头的修复重建

病变股骨头的表面根据病情不同,呈现不同程度的变形、塌陷或缺损,建模时要求恢复其原始形态。以上利用反求技术建立完整髋关节模型的方法,为因病变而发生塌陷或缺损的股骨头建模提供了依据。针对股骨头表面缺损的情况不同,提出两种缺损股骨头修复建模方案:

(1)初期坏死股骨头的表面只发生局部塌陷,球形形态基本完整,这种情况下可直接提取其未病变处的点云数据,按上节中曲面拟合方法,修复重建出其球面模型。

(2)对于表面缺损严重,球面特征已不明显的股骨头,则需要借助于其髋臼球面近似得出股骨头模型。髋关节是典型的杵臼关节,股骨头和髋臼月状面同为球形表面,且球心重合,中间是2~3 mm厚的关节软骨,这在上面的实验中已得到验证。根据这一结构特征,可先拟合出髋臼球面,得到球心,然后用其半径减去软骨厚度得到股骨头球面半径,由此生成股骨头球面。

图10所示为两例因股骨头坏死而出现表面塌陷的股骨头CT重建模型。图10(a)的股骨头处于I期坏死状态,股骨头表面轻微塌陷,而图10(b)的股骨头则处于III期坏死状态,股骨头表面塌陷严重,几乎失去其原始的球面形态。图10(c)、(d)分别为采用上述两种方案对(a)、(b)修复后的模型。

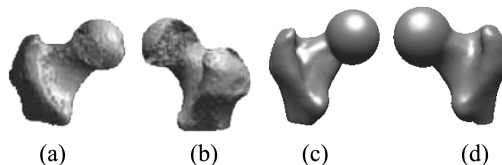


图10 病变股骨头修复重建模型

Fig. 10 Reporative model for collapsed femoral head

4 结 语

本文提出了一种基于CT图像反求技术建立髋关节模型和修复缺损股骨头的建模方法。该方法利用病体本身的CT图像数据,恢复重建其健康状态时的表面形态,与其他利用尸体骨头作为研究对象的建模方法相比,个体匹配性更好。该方法建立的模型可用于术前手术模拟、手术导航等,也可输出STL格式文件,建立与快速原型系统的集成,进一步建立CAD实体模型,为指导髋关节假体的个性化快速制造提供模型支持。

此外,关节的生物力学性能对人体关节机能的恢复具有非常重要的作用,因此需要从组织与器官的生物力学特性方面对正常骨骼和人工骨骼进行比较研究。利用病人自身的CT数据建立用于生物力学分析的关节骨骼有限元模型,是未来工作的方向之一。

参考文献:

- [1] FUCHS B, KNOTHE U, HERTEL R. Femoral

- osteotomy and iliac graft vascularization for femoral head osteonecrosis [J]. **Clinical Orthopaedics**, 2003, **412**:84-93
- [2] 赵德伟, 王卫明, 王本杰, 等. 保留股骨头手术治疗股骨头缺血性坏死 1005 例临床分析[J]. 中华外科杂志, 2005, **43**(16):1054-1057
- [3] HUNGERFORD D S. Osteonecrosis: Avoiding total hip arthroplasty [J]. **The Journal of Arthroplasty**, 2002, **17**(4):121-124
- [4] BELZILE E L, RAUSTOL O A, MOUNASAMY V, *et al.* Femoral head resurfacing in the treatment of osteonecrosis: 3 to 5-year follow-up [J]. **European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology**, 2007, **17**:157-163
- [5] 刘斌, 宋卫卫, 欧宗瑛, 等. 基于剔除拟合的股骨头修复建模[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, **38**(1):58-63
- [6] SONG Wei-wei, LI Guan-hua, OU Zong-ying, *et al.* Model-based segmentation of femoral head and acetabulum from CT images [C] // **2007 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering**. Beijing: IEEE/ICME, 2007, **2**: 581-585
- [7] 刘非, 李涤尘, 卢秉恒, 等. 基于反求工程的个体匹配化骨骼制造方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, **36**(9):938-942
- [8] SUN W, BRADLY C, ZHANG Y F, *et al.* Cloud data modeling employing a unified, non-redundant triangular mesh [J]. **Computer-Aided Design**, 2001, **33**(2):183-193
- [9] LEE K H, WOO H, SUK T. Point data reduction using 3D grids [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2001, **18**(3):201-210
- [10] 王义龙, 马兆龙, 张小, 等. 髋关节冠状断层影像解剖学[J]. 中国临床解剖学杂志, 2005(1):49-52

Modeling for rehabilitation of femoral head based on CT images and reverse engineering

SONG Wei-wei^{1,2}, SU Tie-ming¹, OU Zong-ying^{*1},
ZHAO De-wei³, WANG Wei-ming³, HAN Jun⁴

- (1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;
3. Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, China;
4. Dalian Modern High-Tech Development Co., Ltd., Dalian 116024, China)

Abstract: An innovative 3D modeling method for the hip joint and reparative modeling for femoral head based on CT images and the reverse engineering is proposed. The processing scheme consists of the following steps: first, detecting bone tissues from CT images and segmenting the femoral head and acetabulum respectively by model based on segmentation method. Then, the contours of femur and acetabulum are recorded as the style of points. After being reduced, the part point data of femoral head and acetabulum are extracted respectively and fitted by the way of the least square. Accurate reparative results are achieved from two collapsed femoral head of ANFH patients by the proposed method. Experiments show that the new method can reconstruct hip joint model and regain femoral head of patients perfectly. It can be developed to other joints or bone tissues too. The method affords theoretical model for accurate operation position fixed in orthopedics clinic and biomechanics analyses, and it also provides more effective ways for the individually manufacturing of artificial hip joint.

Key words: hip joint; femoral head reconstruction; CT images; reverse engineering