

西安财经学院信息学院第三届学科会议

# 基于病例CT图像的健康股骨头 建模研究

汇报人:陈树广  
2009年5月

# 一年回顾

一年来，在学院各位领导的英明领导及鞭策下，取得一点微不足道的成绩，但是与各位相比相差甚远，斗胆在这里向在座的各位专家、领导与同仁们进行汇报，不足与不妥之处请各位提出与指正，谢谢各位的关心与理解。

下面浪费大家十几分钟时间。

# 一年来取得的成绩

- 发表论文五篇（独立）
  - 《RS485总线在智能抄表系统中的应用研究》
  - 《基于病例CT图像的健康股骨头建模研究》
  - 《IPv6下入侵检测系统的设计》
  - 《C++中拷贝构造函数和拷贝赋值运算符安全漏洞分析》
  - 《木马伪装技术的研究与仿真》

# 一年来取得的成绩

- 发表论文（合作）
- 《一种基于二维图像的三维仿真方法研究》
- 《基于模糊控制的桥式起重机定位防摆研究》
- 目前又投出四篇,但愿能够中标率高点。

# 基于病例**CT**图像的健康股骨头建模研究

我的这篇文章以还原病例健康时的股骨头形状为目的，提出了一种基于病例**CT**扫描图像的原始股骨头仿真建模方法。

# 基于病例CT图像的健康股骨头建模研究

方法就是利用自动分割法提取CT扫描序列断层图像中的髋臼轮廓，使用辐条式采样法得到髋臼凹面的空间坐标点集，在剔除坐标集中的误差采样点后，采用闭合形式解的最小二乘法拟合健康的股骨头球面模型。

- 并在算法研究完成后，将方法应用于一具体实例，仿真结果证实该方法对健康股骨头模型的仿真效果良好，可以为医学临床手术提供精确定位的理论模型，以及为人工假体的制造提供实践方法。

# 论文撰写与研究背景

本项目是我在2007年与2008年期间参与西北工业大学我导师武君胜教授承担上海伽玛星科技发展有限公司的《伽马刀智能运行控制研究》一项目时，我所负责图像的识别与轮廓提取的一算法。

当今，股骨头缺血性坏死是一种世界性疾病。据报道，美国每年新发病例达1~2万人，我国的发病率是其发病率的2~3倍。现阶段，人工关节置换是最常见的治疗方法之一。人工股骨头假体的种类较多，但无论是国产的还是进口的假体，均采用统一的机械零件化生产及供应模式，但事实上人体的器官一般存在较大个体差异，因此为患者植入的人工股骨头假体并不一定能与髋臼良好配合，结果导致患者术后股骨活动不自如，所以，根据患者本身的个体器官参数，将坏死的股骨头还原为健康状态下的股骨头模型成为当前股骨头修复治疗的研究热点。

# 论文撰写与研究背景

目前，针对股骨头修复建模的研究还处于初始阶段，常见方法有：利用断层序列图像上股骨头外围轮廓叠加来估测股骨头塌陷后的模型状态方法；在MRI（核磁共振）图像中利用容积绘制来估测坏死的股骨头中塌陷程度的方法。上述成果虽然促进了股骨头修复研究的发展，但这些已有方法大多是利用多病例样本条件下的概率统计结果，只能反映股骨头坏死后的状态，不能重构出健康时的股骨头模型状态，与通过目标病例本身参数获得的实际结果有较大差异。

# 论文撰写与研究背景

针对上述问题，我联想到我所承担的任务时的模型，就提出一种基于病例CT图像的健康股骨头建模方法，即将股骨头模拟为一个球面，利用病例本身未损坏的髋臼月状面上的数据点坐标参数，通过拟合的方法还原。实验表明，该方法得到的结果良好地反映了目标病例健康状态时的股骨头模型状态，克服概率统计法在重构健康模型时的不足。

# 髋臼边缘提取原理

本文基于髋关节生理学组成，利用CT扫描图像，提取髋臼边缘。

# 髌臼边缘提取原理

## 髌关节组成

髌关节由股骨头与髌臼连结构成，是典型的杵臼关节。髌臼内有半月形的关节面，称为月状面。窝的中央未形成关节面的部分，称为髌臼窝。髌臼缘下方的缺口，称为髌臼切迹。股骨头位于人体最长和最结实的长骨——股骨的上端，朝向内上前方，与髌臼的月状面相关节。股骨头的关节面约为球面的 $\frac{2}{3}$ ，几乎全部纳入髌臼内。髌关节具有较大的运动稳定性，可作屈、伸、收、展、旋内、旋外和环转运动，股骨头与髌臼之间是以月状面为接触面的球铰接。

# 髋臼边缘提取原理

股骨头缺血性坏死的根本病状为股骨头球面出现囊性塌陷，导致其与髋臼之间的滑动连接受阻，股骨与髋骨之间的相对运动不自如，股骨头缺血性坏死的修复目标是使坏死的股骨头恢复为健康状态时的球面模型状态，从而恢复股骨头与髋臼之间正常的球铰接运动。

# 髋臼边缘提取原理

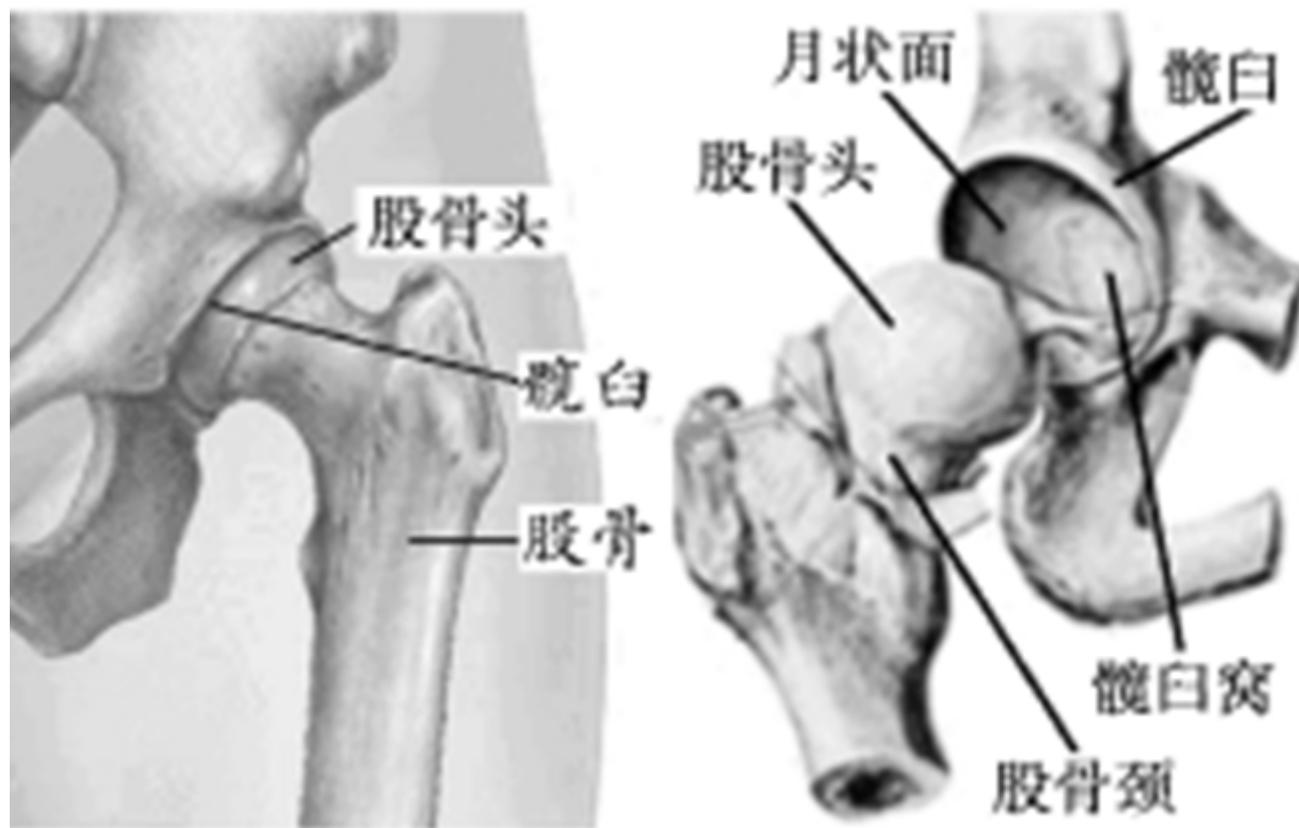
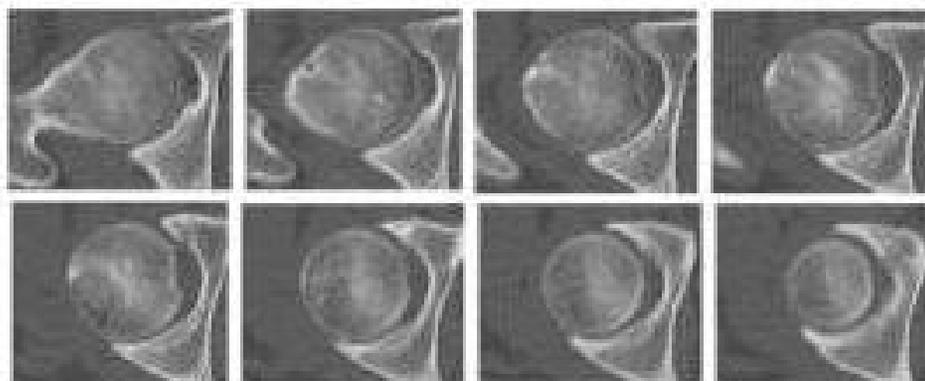


图1：髋关节结构图

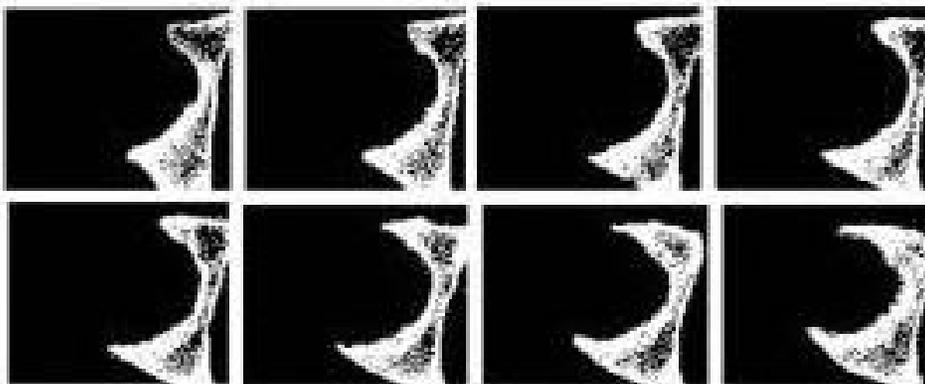
# 髋臼边缘提取原理

髋臼边缘提取，主要是通过多层螺旋CT扫描采集到股骨头部位的断层序列图像，采用一种精确的自动分割方法，除去图像中的其他组织部分，提取髋臼边缘，从而达到获得每一层图像中髋臼轮廓准确参数的目的。

# 髌臼边缘提取原理



原始CT图像



髌臼二值化图像

图2原始图像与二值化图像对比

# 髌臼边缘提取原理

- 。此方法的主要处理过程为：
- 1)、预处理，包括对图像数据进行重采样，利用一种改进的sinC插值法和高斯滤波器使图像更加平滑；
  - 2)、利用传统的直方图阈值法和二值形态学操作，提取图像中的骨组织；
  - 3)、利用大转子和股骨头外形参数约束，估算股骨头的初始轮廓以及股骨头与髌臼之间的连接间隙宽度；
  - 4)、利用Hessian滤波器增强连接间隙宽度；
  - 5)、利用4)中得到的滤波后图像，精炼3)中得到的粗糙边缘。

# 髑臼边缘提取原理

## 数据点采样

获得髑臼轮廓的二值化图像后，还需在每一层图像上对髑臼月状面进行数据点的采样。考虑到空间坐标采样过程中采集到的坐标点数据的有效性，需要对误差点进行剔除。

# 髋臼边缘提取原理

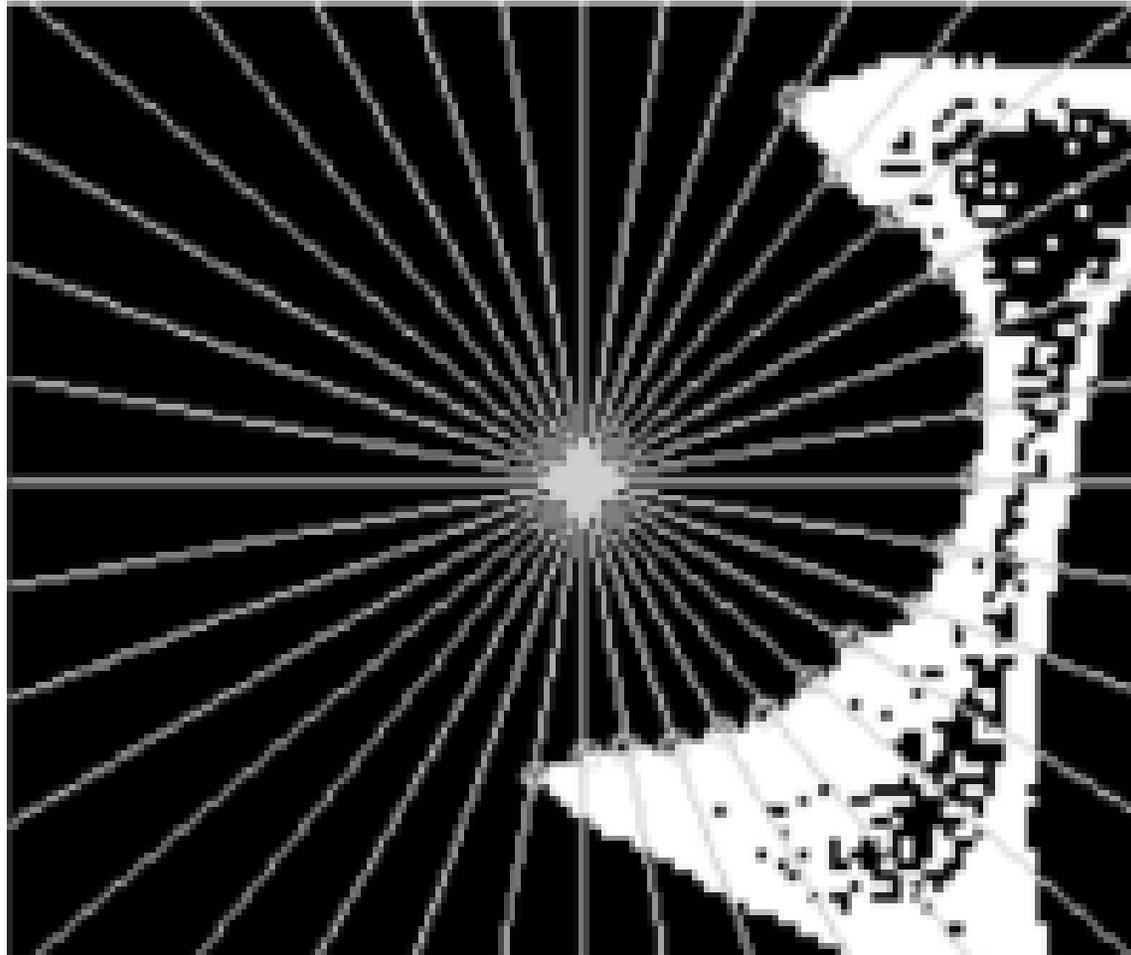
## 采样原理

一般的采样方法为等距栅格采样，等距分布的栅格线与目标轮廓的交点即为采样点。在针对髋臼组织的采样中，此方法不但会采集到月状面以外没有价值坐标点，而且采集到的月状面上的坐标点分布也不均匀，与股骨头接触最紧密的月状面上只能采集到很少的坐标点。

# 髁臼边缘提取原理

因此，为使采样过程做到更加均匀、合理，根据髁臼组织的特殊结构特征，我提出一种辐条式采样法，即以髁臼二值化局部图像的块中心处为轴心，向四周发散射线，相邻两条射线间的夹角为某一固定值(本文取 $10^\circ$ )，当每一条射线与图像中髁臼轮廓相交时，即可得到一个坐标采样点，如图3中小圆圈所示。在同样搜索代价的条件下，等距栅格法得到17个采样点，其中有5个是无效点，样本合格率仅为70.59%，而本文方法得到的17个采样点全部为有效样本，且分布合理。

# 骹白边缘提取原理



- 图3：辐条式采样

# 髌臼边缘提取原理

## 误差点的剔除

得到了髌臼月状面的空间坐标采样点集后，即可以利用这些坐标点来拟合髌臼月状面所在球面SA。因为股骨头与髌臼之间是球铰接滑动副运动，所以SA与股骨头凸面所在球面SF是同心球，由此可以确定SF的球心坐标(X, Y, Z)。图1所示，股骨头与月状面之间存在微小间隙，经分析可知，此间隙是由于患者平躺时身体无负重而引起的关节脱离，当身体正常直立状态时，股骨头与月状面之间是良好紧密配合的，因此可以认为SF与SA的半径也相等。

# 髑臼边缘提取原理

- 假设SA的曲面方程为：

- $(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2 = R^2$  (1)

- 利用最小二乘法可转化为求解目标函数最小值问题

$$L(X, Y, Z, R) = \sum_{i=1}^n$$

- $((x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 - R^2)^2$  (2)

- 式中， $n$ 为髑臼月状面上的空间坐标采样点数。

# 髌臼边缘提取原理

- 但是，在空间坐标采样过程中采集到的坐标点并非全部是有效数据，误差采样点主要来自于二方面：
  - 1)、因为髌臼的特殊结构，其表面并非是一个连续完整的曲面，还包含有髌臼窝、髌臼切迹等特殊凹陷部位，所以在采样射线探测到这些非关节面时就会引入一些误差量较大的采样点；
  - 2)、在月状面上采样时，由于测量精度等因素也会使某些采样点带有一定坐标误差。因此，为使拟合后获得的球面更加准确，需要进一步清洗空间坐标采样点集内的数据剔除这些无效的脏数据。

# 骹白边缘提取原理

- 剔除误差采样点的流程如下：
- 1)、在空间坐标采样点集中，取N组四元坐标点序列，每组坐标点序列由采样点集内随机任意4个不共面的坐标点  $P_k(x_k, y_k, z_k)$ ， $k=1,2,3,4$ 组成。
- 2)、将 $P_k(x_k, y_k, z_k)$   $k=1,2,3,4$ 带入SA的曲面方程，从而确定球心坐标和半径。

$$X_c = A / D$$

$$Y_c = B / D$$

$$Z_c = C / D$$

$$R_c = \sqrt{(x_i - X_c)^2 + (y_i - Y_c)^2 + (z_i - Z_c)^2}$$

# 骹白边缘提取原理

$$A = \begin{vmatrix} s_2 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ s_3 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ s_4 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$B = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & s_2 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & s_3 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & s_4 & z_4 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$C = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & s_2 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & s_3 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & s_4 \end{vmatrix}$$

$$s_j = \frac{(x_j^2 + y_j^2 + z_j^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2)}{2}$$

- 其中：  $j = 2, 3, 4$

# 骹白边缘提取原理

- 3)、利用均值法计算球心坐标及半径的迭代初始基准值。

$$X_b = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_{ct} \quad Y_b = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Y_{ct}$$

$$Z_b = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_{ct} \quad R_b = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N R_{ct}$$

# 骹白边缘提取原理

- 4)、遍历空间坐标采样点集，计算每一个采样点的拟合残差为：

$$v_i = \sqrt{(x_i - X_b)^2 + (y_i - Y_b)^2 + (z_i - Z_b)^2 - R_b^2}$$

拟合残差直方图呈高斯分布，可以对误差较大的采样点进行剔除处理。本文采用 $3\sigma$ 准则剔除误差采样点。另外，为保证采样点分布的广泛性与普遍性，还需要引入分布范围方面的约束，即必须确保采样点遍及在较大范围内，同时尽量均匀分布。

# 骹白边缘提取原理

- 5)、据贝塞尔公式计算标准差估计量
- 如果某采样点拟合残差大于**3s**，则认为粗大误差采样点属于异常数据并且如果满足在该采样点所在射线的正负旋转相邻**2**条采样射线范围内，存在有效采样点，则剔除该采样点。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

# 骹白边缘提取原理

- 6)、更新采样点集，重复1)~5)，当新的空间坐标采样点集中没有粗大误差采样点时，剔除处理结束。

# 髋臼边缘提取原理

- 整个处理过程中，系统首先剔除的是非关节面(髋臼窝和髋臼切迹)上的大误差量采样点，然后剔除的是月状面上的小误差量采样点，反复迭代，逐次逼近，最终使空间坐标采样点集内的坐标点全部为有效数据。

# 球面拟合

- 获得全部正常数据的空间坐标采样点集后，即可以利用这些采样点集拟合出股骨头形状。
- 拟合过程通过求解最小值表达式(2)的最小值来获得股骨头凸面所在球面SF的球心坐标(X, Y, Z)。由于式(2)存在闭合形式解，所以根据数值分析有关原理对式(2)求偏导则有：

# 球面拟合

$$\frac{\partial L}{\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial Y} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial Z} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial R} = 0$$

# 球面拟合

• 得:

• 
$$X = \frac{C_1}{2C_2} \qquad Y = \frac{C_3}{2C_2}$$

$$Z = \frac{C_4}{2C_2}$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2}{n}}$$

# 球面拟合

• 其中：

$$C_1 = (C_{xx^2} + C_{xy^2} + C_{xz^2})(C_y^2 C_z^2 - C_{yz}^2) + \\ (C_{yx^2} + C_{yy^2} + C_{yz^2})(C_{xz} C_{yz} - C_{xy} C_z^2) + \\ (C_{zx^2} + C_{zy^2} + C_{zz^2})(C_{xz} C_{yz} - C_{xz} C_y^2)$$

$$C_2 = C_x^2 C_y^2 C_z^2 + 2C_{xy} C_{xy} C_{xz} - C_x^2 C_{yz}^2 - C_y^2 C_{xz}^2 \\ - C_z^2 C_{xy}^2$$

# 球面拟合

$$\begin{aligned} C_3 = & (C_{xx^2} + C_{xy^2} + C_{xz^2})(C_{xz}C_{yz} - C_{xy}C_z^2) + \\ & (C_{yx^2} + C_{yy^2} + C_{yz^2})(C_x^2C_z^2 - C_{xz}^2) + \\ & (C_{zx^2} + C_{zy^2} + C_{zz^2})(C_{xy}C_{xz} - C_{yz}C_x^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_4 = & (C_{xx^2} + C_{xy^2} + C_{xz^2})(C_{xy}C_{yz} - C_{xy}C_z^2) + \\ & (C_{yx^2} + C_{yy^2} + C_{yz^2})(C_{xz}C_{xy} - C_{yz}C_x^2) + \\ & (C_{zx^2} + C_{zy^2} + C_{zz^2})(C_x^2C_y^2 - C_{xy}^2) \end{aligned}$$

# 球面拟合

$C_{\alpha\beta}$  • 为协方差 (  $\alpha$  、  $\beta$  为 )

$x, x^2, y, y^2, z, z^2$

$$C_{\alpha\beta} = \frac{n \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n \beta_i}{n^2 - n}$$

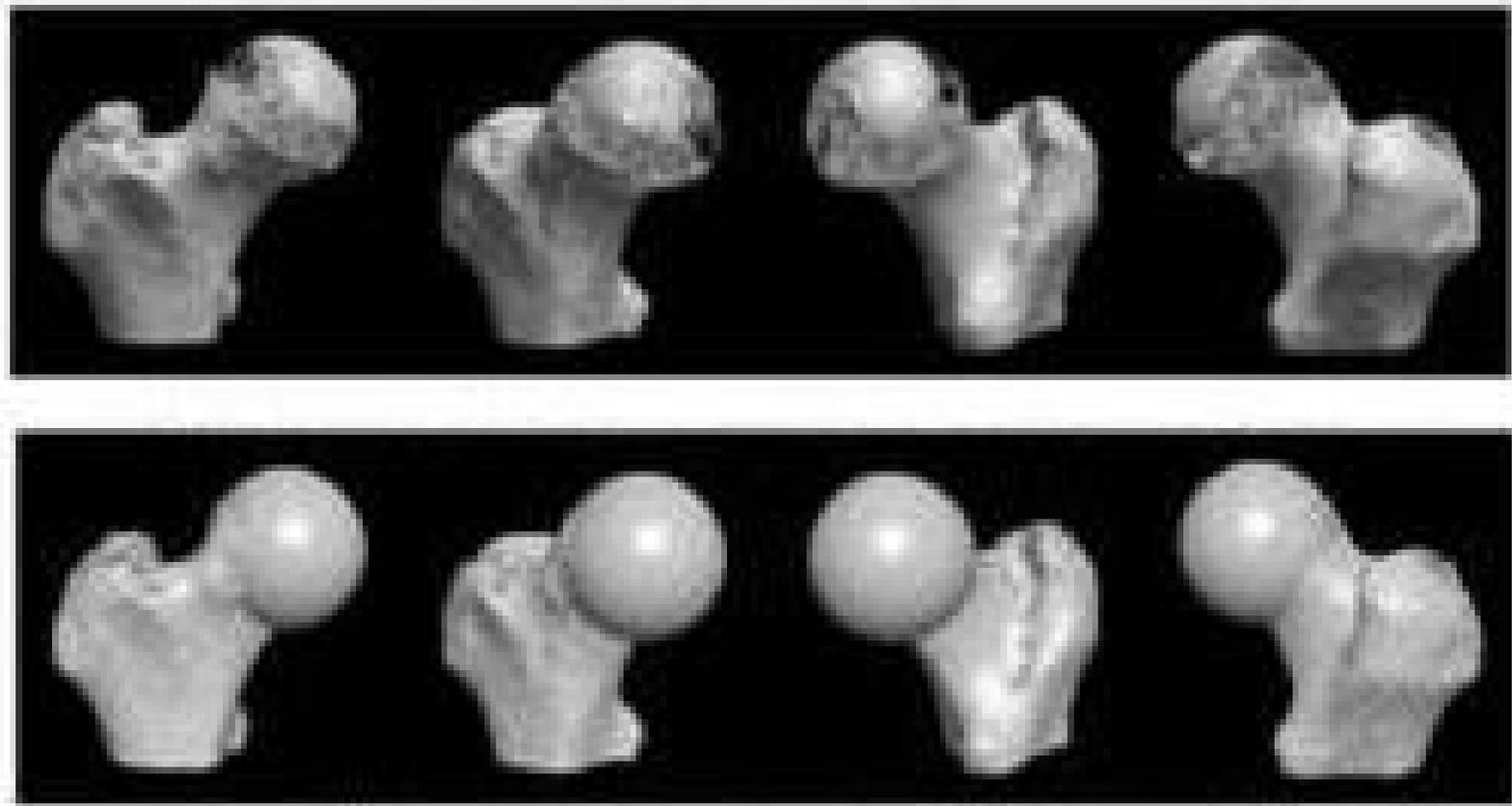
# 应用实例

采用上述方法，在原有病例CT图像的基础上，进行的健康股骨头建模效果图。该病例为一男性，59岁，处于III期坏死状态，双侧股骨头可见囊状透光区，边缘可见硬化，表面塌陷严重，关节间隙变窄，双侧股骨头有软骨下骨折变形，呈“新月征”。经三维重建后，上面一行图为病态时的三维重建效果，下面一行为修复后的健康状态时的效果。可以看出，利用本文方法可以良好地还原坏死的股骨头模型。同时，本文方法面向目标病例本身的图像数据进行处理，获得的结果还可重构出目标病例健康状态时的股骨头模型。

# 应用实例

- 从临床实践反馈可以看出，采用该方法后，医生在术前就可以准确地标定目标股骨头的外形尺寸，从而较大程度地缩短了手术时间，提高了手术质量。验证了上文提出仿真方法的可信性与实用性。

# 应用实例



- 图4：三维重建结果

# 结论

本文提出了一种修复重建股骨头模型的新方法。本方法利用一种精确的自动分割方法提取出目标病例断层图像中的髋臼边缘,使用辐条式采样法在髋臼边缘上获得均匀、合理的采样点,剔除空间坐标采样点集中的误差数据,采用闭合解形式的最小二乘法拟合出股骨头球面模型,实验证明此方法良好地重建出该目标病例健康时的股骨头模型。

谢谢大家！