

· 临床新技术 ·

基于亚像素 CT 的髋关节置换配准技术的研究与设计*

战丽波, 邢娟, 李向民

(滨州医学院基础医学院, 山东烟台 264003)

[摘要] 目的 解决髋关节置换术中参数的精准匹配问题, 以提高定位的可靠性、准确性。方法 2019 年 1 月在基于 Microsoft Visual C++ 的数字 X 线摄影长骨与骨模自动配型系统研究的基础上进一步研究基于亚像素 CT 的髋关节置换配准技术, 包括 CT 中人体髋关节、人工髋关节关键参数的提取、骨骼与人工关节个体化智能匹配方法, 以及人工关节置换过程的动态模拟等。结果 基于亚像素 CT 的髋关节置换配准技术能较好地解决手术中的参数精准匹配问题, 从而提高手术的精确性。结论 该技术能更准确地提取 CT 中的骨骼轮廓和人工髋关节图像的髋关节轮廓, 解决了传统配准中轮廓提取模糊、匹配精度不足的问题, 实现了髋关节置换配准的高精度化, 为计算机辅助髋关节置换的标准化发展奠定了基础。

[关键词] 影像技术; 图像边缘提取; 图像配准; 亚像素 CT

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2026.02.028

中图法分类号:R687.4;TP391.41

文章编号:1009-5519(2026)02-0400-03

文献标识码:A

Research and design of a subpixel CT-based registration technique for total hip arthroplasty*

ZHAN Libo, XING Juan, LI Xiangmin

(School of Basic Medical Sciences, Binzhou Medical University, Yantai, Shandong 264003, China)

[Abstract] **Objective** To achieve precise parameter matching in total hip arthroplasty for enhanced positioning reliability and accuracy. **Methods** Based on the research of the Microsoft Visual C++-based automatic matching system for long bones and bone models in digital radiography(DR), further investigation was conducted in January 2019 on subpixel CT-based registration technique for total hip arthroplasty. The study involved the extraction of key parameters from CT images for both the natural and prosthetic implants, the development of a patient-specific intelligent matching method between the bone and prosthetic components, and the dynamic simulation of the total hip arthroplasty procedure. **Results** The subpixel CT-based registration technique for total hip arthroplasty was able to effectively address the issue of precise parameter matching during surgery, thereby enhancing procedural accuracy. **Conclusion** This technology enables highly accurate extraction of both bone contours from CT data and prosthesis contours from prosthetic implant images. It effectively addresses the limitations of blurred contour delineation and inadequate matching precision inherent in conventional registration methods, thereby achieving high-accuracy hip arthroplasty registration and establishing a critical foundation for standardized computer-assisted hip replacement procedures.

[Key words] Imaging technology; Image edge extraction; Image registration; Subpixel CT

伴随社会老龄化, 老年人髋关节疾病问题越来越突出, 而随着临床技术的不断进步, 人工髋关节置换术成为治疗髋关节疾病的重要手段, 具有有效缓解疼痛、提高髋关节稳定性、恢复髋关节功能等优点。然而在传统的手术中由于医生有限的可视区域, 需反复多次获取患部的 X 光图像, 而获取植入物与患骨之间的位置信息的过程是不连续的, 这就要求医生的临床经验非常丰富。并且这一过程使医生与患者受 X 光辐射剂量增大、手术时间延长, 导致患者感染的风险

增加^[1]。另外多数患者在决定进行髋关节置换时髋关节疾病已至晚期, 存在严重髋关节畸形和骨缺损等情况^[2-3], 这就使得医生在手术中面临更多的复杂情况, 使手术风险增大。

传统髋关节置换手术首先要进行术前 X 线片检查, 然后在术中利用机械导向装置进行髓内、外定位截骨, 医生在很大程度上是凭借肉眼、手感和自己的临床经验进行手术。因此, 患部和假体对位、对线是依赖医生的主观观察和自身经验完成的, 主观性很

* 基金项目: 山东省医药卫生计划项目(2018WS555)。

作者简介: 战丽波(1978—), 博士研究生, 副教授, 主要从事医用物理学教学和研究工作。

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20251016.0949.002\(2025-10-16\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20251016.0949.002(2025-10-16))

大,会直接影响定位的可靠性和手术的精确性,关系到手术的成败^[4-5]。据文献报道,高达 50% 的早期翻修术与力线不当、假体摆位不当及髋关节失稳有关^[6]。因此,手术方法的精确度问题是困扰手术医生的主要问题。

提高髋关节置换精确度的关键在于术前配准,这是计算机辅助人工髋关节置换手术系统的基础,也是手术成功的关键^[6-7]。计算机辅助手术在国内外均是先进的医疗技术,在矫形外科、颌面外科、神经外科领域均已有了较为成熟的研究,但在髋关节置换术中选择精确的外科参数问题未得到完善解决^[8-10]。因此,针对髋关节置换术中面临的配准精确度问题,本研究深入探讨了基于亚像素 CT 的人工髋关节置换配准技术,包括骨骼 CT 中人体髋关节关键信息的提取、人工髋关节关键信息的提取、骨骼与人工髋关节个性化智能匹配方法,以及人工髋关节置换过程的动态模拟等。同时在战丽波等^[11]完成的基于 Microsoft Visual C++(简称 VC)的数字 X 线摄影长骨与骨模自动配型系统研究的基础上运用亚像素配准技术^[12-15]更为精准地提取 CT 的关键特征区域,建立骨骼与人工髋关节的匹配模型,确定人工髋关节置入的最佳方位。

1 资料与方法

1.1 研究对象 本研究临床 CT 数据来源于 2020 年 1 月至 2023 年 12 月在滨州医学院附属医院骨科及关节外科就诊的髋关节疾病患者,其中需接受人工髋关节置换术的病例纳入影像资料。

1.2 方法

1.2.1 骨模配型系统的总体设计及各模块功能 本研究的软件系统是基于 VC 环境开发的,包括图像信息显示模块、编辑模块、分析模块和数据库模块。见图 1。图像信息显示模块不仅包括患者的 DR、CT 等影像学信息,系统还能通过互联网连接到医院信息系统获取患者基本信息、主治医生信息、图像生成设备信息等。编辑模块对影像学信息进行预处理,为后续的手术提供精确的测量信息,包括图像增强、去噪、二值化、边缘提取 4 个功能。分析模块实现了对患者影像学信息具体特征进行定量分析。数据库模块由两大部分构成:(1)影像学管理模块,包括对处理完的图片进行存储和删除操作;(2)骨模数据库,用于存储不同规格的骨模,当患者影像学信息的精确确定后系统会自动从骨模数据库中搜索与之匹配的骨模,提高手术效率。

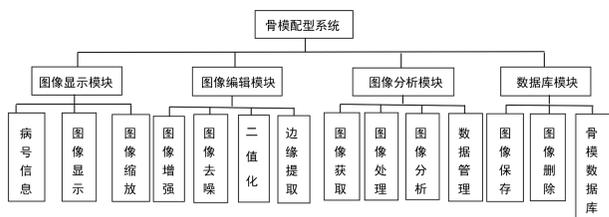


图 1 系统功能结构图

1.2.2 骨模配型系统实现的技术路线 骨模配型系统实现的技术路线主要由三部分构成。见图 2。

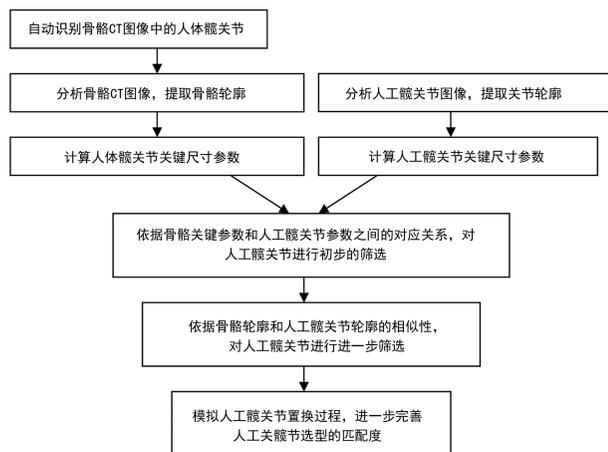


图 2 技术路线图

1.2.2.1 骨骼 CT 人体髋关节关键信息的提取 (1) 自动识别骨骼 CT 中的人体髋关节。人体骨骼结构存在很大的个体差异,髋关节部分在 CT 中的位置、形状均会有所不同,但又具有一定相似性。利用这一特性先将某张人体髋关节图像作为模板,然后通过模板匹配算法的研究,查找人体骨骼 CT 中与该模板匹配度最高的区域,该区域即为该骨骼 CT 中的髋关节区域。自动识别骨骼 CT 中的人体髋关节区域,是对人工髋关节进行智能匹配的前提。本研究图像处理技术采用亚像素配准技术,能更准确地提取 CT 中的骨骼轮廓和人工髋关节图像的髋关节轮廓,而且亚像素技术使轮廓提取的理论精度小于 1 个像素,可有效提高轮廓提取的准确性。(2) 对骨骼 CT 中的髋关节区域进行分析,提取髋关节轮廓。骨骼轮廓是进行人工髋关节智能匹配的主要依据,提取骨骼内壁轮廓是智能匹配人工髋关节的关键。此外骨骼 CT 中骨骼区域和非骨骼区域并没有清晰的分界线,普通的图像分割算法很难准确地提取骨骼轮廓。本研究首先考虑骨骼轮廓边缘的模糊性。骨骼轮廓的初步提取利用脊波变换,能充分考虑图像边缘的奇异性和方向性,这对处理高维情况时的面状或线状奇异性非常有效。技术关键是通过 Radon 变换将线状奇异性转化为点状奇异性,再利用小波变换处理 Radon 域上的点状奇异性。然后运用亚像素技术,更精确地提取骨骼轮廓。假设灰度值梯度在沿骨骼轮廓边缘法线方向呈高斯曲线分布,基于这种假设采取迭代搜索策略,利用初始轮廓点沿法线方向的邻域梯度拟合该高斯曲线,直至高斯曲线拟合误差最小为止。(3) 分析骨骼轮廓信息,计算骨骼关键参数。运用亚像素技术提取 CT 中标尺的轮廓信息,并在此基础上研究 CT 的标定算法,进一步建立像素和实际尺寸之间的对应关系。通过对骨骼轮廓的分析,确定关键点的位置,如骨骼两侧轮廓距离最近的两个点等,并计算与人工髋关节选型相关的关键尺寸,其中关键点位置的确定需结合临床

实验进行。

1.2.2.2 人工髋关节 CT 关键信息的提取 (1)对人工髋关节 CT 进行分析,提取人工髋关节图像的轮廓信息。与骨骼轮廓相同,人工髋关节图像中的轮廓也是智能匹配的主要依据,准确提取人工髋关节轮廓非常重要。(2)分析人工髋关节轮廓信息,获取人工髋关节关键参数。通过对人工髋关节轮廓的分析,计算和人工髋关节选型相关的关键尺寸。对人工髋关节 CT 关键信息的提取所采用的技术与提取骨骼 CT 关键信息的技术一致。

1.2.2.3 人体骨骼与人工髋关节个性化智能配准方法 (1)依据人工髋关节轮廓和人体骨骼轮廓中关键参数的对应关系,建立人工髋关节筛选知识库,完成人工髋关节的初步筛选。其中对应关系的建立,将会通过做相关临床实验完成。(2)将提取的骨骼轮廓和人工髋关节轮廓进行比较,分析二者形状上的相似程度。相似程度越高,人工髋关节和骨骼接触时接触面就越大,不容易出现应力集中现象,可建立二者之间的匹配模型,从而筛选出和骨骼轮廓匹配度最高的人工髋关节轮廓。在髋关节匹配的过程中既考虑轮廓关键尺寸参数的相关性,也考虑其形状相似性。从多个方面进行选型,有效保证选型符合度,提高匹配精度。技术核心是对轮廓进行拟合时运用道格拉斯-普克法,提取轮廓关键点,根据保留轮廓点来构建二维几何特征不变量,在此基础上比较骨骼轮廓和人工髋关节轮廓的相似程度。(3)以人工髋关节轮廓和骨骼轮廓为基础,通过对人工髋关节置换过程的动态模拟,判断是否发生干涉,进一步提高人工髋关节选型的匹配度。采用新的技术路线动态模拟人工髋关节置换过程。运用脊波变换、亚像素技术提取骨骼轮廓信息,计算轮廓对称线,保证两侧的骨骼轮廓相对于该对称线基本对称。对人工髋关节图像骨架化处理,获取人工髋关节中心线,将中心线上的一点作为基点,沿着对称线行走,保证中心线在该基点切线方向和骨骼轮廓对称线在基点切线方向一致,并通过分析骨骼轮廓是否和人工髋关节轮廓相交,即发生干涉。

2 结 果

基于亚像素 CT 的髋关节置换配准技术能较好地解决手术中的参数精准匹配问题,从而提高手术的精确性。

3 讨 论

针对髋关节置换术中面临的配准精确度问题在战丽波等^[11]完成的基于 VC 的 DR 骨模自动配型系统

的基础上运用亚像素配准技术能更准确地提取 CT 中的骨骼轮廓和人工髋关节图像的髋关节轮廓。亚像素技术使轮廓提取的理论精度小于 1 个像素,该技术有效提高了轮廓提取的准确性,建立了骨骼与人工髋关节的准确匹配模型,确定了人工髋关节置入的最佳方位。下一步的研究将积累不同病理类型的临床数据,以明确技术的最佳适用场景,并基于数据制定标准化操作流程,避免因技术应用不规范导致的效果差异。

参考文献

- [1] 张先龙,王坤正.人工关节感染:实践和思考[M].上海科学技术出版社,2020:102-105.
- [2] 吴建浓,干铁儿,周亚芬.人工关节置换术患者术后医院感染危险因素分析[J].中华医院感染学杂志,2014,24(21):5357-5359.
- [3] 曹力,周勇刚.人工髋关节翻修临床实践与思考[M].人民卫生出版社,2015:96-100.
- [4] 王博,杨琳,李亦丞,等.全膝关节置换术后主要失败原因分析[J].实用骨科杂志,2023,29(8):684-688.
- [5] 宫首航,程飘涛,李陈诚,彭筋宸.多次髋翻修后全股骨假体置换:1例报告与文献综述[J].中国矫形外科杂志,2022,30(21):1962-1966.
- [6] 肇刚,安明扬,王江涛,等.髋关节镜翻修术的原因与临床效果[J].中国矫形外科杂志,2022,30(5):399-404.
- [7] 肖何,杨德盛,史占军,等.髋关节翻修术中头柄混合组合1例报道及文献回顾[J].中华骨与关节外科杂志,2024,17(8):744-748.
- [8] 顾建明,冯啸,周一新.1422例人工髋关节翻修术病因分析[J].中华骨与关节外科杂志,2021,14(4):267-271.
- [9] 武勇.全踝关节置换术专家共识[J].中华骨与关节外科杂志,2024,17(10):865-872.
- [10] 黄华文.计算机辅助外科技术的应用与发展[J].中国医疗器械信息,2017,13(1):18-26.
- [11] 战丽波,秦东京,李祥林.基于 VC 骨模自动配型系统的设计与实现[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(52):9723-9725.
- [12] 王凡.基于改进亚像素配准的数字图像相关法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [13] 王森华,李建平,杨永琴.基于小波分析的亚像素配准算法[J].计算机应用,2016,29:213-215.
- [14] 谭立文,胡南,宋林.亚像素断层图像配准数据集的建立[J].局解手术学杂志,2017,17(5):302-305.
- [15] 黎俊,彭启民,范植华.亚像素级图像配准算法研究[J].中国图象图形学报,2017,13(11):2070-2074.

(收稿日期:2025-04-16 修回日期:2025-11-03)