

文章编号: 1004-7220(2024)06-1228-07

# 人工智能赋能的全髋关节置换术进展

黄寅殊<sup>1</sup>, 单浩杰<sup>2</sup>, 于晓巍<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海交通大学医学院附属第六人民医院 骨科, 上海 200233)

**摘要:** 全髋关节置换术 (total hip arthroplasty, THA) 的术前规划、术中导航和术后康复等环节, 都因人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的介入而得到显著优化。本文综述 AI 技术在医疗影像分割和配准方面的最新进展, 特别关注其在 THA 中的应用。医疗影像与自然影像的显著差别对 AI 算法的设计构成挑战。深度学习技术, 特别是 CNN、U-Net 和 Transformer 模型, 在各项医疗影像分割和配准任务上表现突出。AI 技术通过深度学习分析 CT 影像, 显著提高了髋部病变的识别准确性。在术中引导方面, AI 系统利用智能分割和运动状态模拟, 为手术提供实时导航和精确定位, 有效提升手术效率。AI 技术还涉及手术成本预测和术后康复, 通过马尔可夫模型等方法, 为医疗决策提供了有力的数据支持。随着深度学习技术的不断进步, 医疗影像分析正逐步实现自动化和智能化, 对改善患者的整体手术体验和临床结果具有重大的临床意义, 预示着未来在医疗影像领域可能实现的新突破。

**关键词:** 人工智能; 髋关节置换术; 术前规划; 医疗影像分割; 医疗影像配准

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.06.030

## Advances in AI-Enabled Total Hip Arthroplasty

HUANG Yinshu<sup>1</sup>, SHAN Haojie<sup>2</sup>, YU Xiaowei<sup>2</sup>

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;  
2. Department of Orthopedics, Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Preoperative planning, intraoperative navigation, and postoperative rehabilitation of total hip arthroplasty (THA) have been significantly enhanced by the integration of artificial intelligence (AI) technology. This review summarizes the latest advancements in AI technology for medical image segmentation and registration, with a particular focus on its application in THA. The notable differences between medical and natural images present challenges for the design of AI algorithms. Deep learning techniques, especially CNN, U-Net, and Transformer models, have demonstrated an outstanding performance in various medical image segmentation and registration tasks. The AI technology, through deep learning analysis of CT images, has significantly improved the accuracy of identifying hip pathologies. In terms of intraoperative guidance, AI systems provide real-time navigation and precise positioning for surgeries by utilizing intelligent segmentation and motion state simulation, effectively enhancing surgical efficiency. AI technology also encompasses surgical cost prediction and postoperative recovery, offering robust data support for medical decision-making through method such as Markov models. As deep learning technology continues to advance, the analysis of medical images is progressively achieving automation and intelligence, which has significant clinical implications for improving patients' overall surgical experiences and outcomes, suggesting potential new breakthroughs in the field of medical imaging in the future.

收稿日期: 2024-05-12; 修回日期: 2024-06-18

基金项目: 上海市 2022 年度“科技创新行动计划”技术标准项目 (22DZ2203600), 上海市创新医疗器械应用示范项目 (23SHS02800)

通信作者: 于晓巍, 博士生导师, E-mail: yuxw@sjtu.edu.cn

**Key words:** artificial intelligence (AI); total hip arthroplasty; preoperative planning; medical image segmentation; medical image registration

在医疗领域,人工智能 (artificial intelligence, AI) 正逐步成为提升手术精度和患者护理质量的关键技术。全髋关节置换术 (total hip arthroplasty, THA) 作为常见的关节手术之一,其术前规划、术中导航和术后康复的每一个环节,都可因 AI 的介入而得到显著优化。本文通过系统性地筛选和分析近 5 年国内外在医疗影像领域关注髋关节病变及其手术治疗的研究文献,综述内容如下:

### (1) AI 方法的进展

医疗影像分析与自然影像处理在多个层面上存在显著差异,不同技术都提供独特的生物信息。此外,医疗影像的像素值范围、噪声特性、伪影问题以及数据量的局限性,都对 AI 算法的设计和应用提出了特殊挑战<sup>[1]</sup>。

深度学习、卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN), 已成为提高医疗影像分割准确性的核心技术,其在三维结构分割中展现出卓越的性能<sup>[2-4]</sup>。U-Net 及其变体,以其对称的 U 形结构和跳跃链接,成为医疗影像分割任务的重要参考模型<sup>[5]</sup>。最近,Transformer 模型凭借自注意力机制在医疗影像分析中显示出巨大潜力,而且在小数据量的情况下也表现出色<sup>[6-7]</sup>。结合 Transformer 和 U-Net 优势的模型,如 Swin-Unet 和 MCTrans,已经在多个分割任务中显示出卓越的性能,证明了融合两种模型的优势<sup>[8-10]</sup>。

### (2) THA 的应用

AI 技术在术前诊断和规划中的应用,通过深度学习分析 CT 影像,提高了髋部病变识别的准确性,优化了手术规划过程<sup>[11-12]</sup>。借助有限元分析,AI 方法可分析不同材料的髋关节假体的受力情况,可进行各方面生物力学运动力量训练的研究分析,有助于模拟手术以及康复情况<sup>[13-14]</sup>。在术中引导方面,AI 系统通过智能分割和运动状态模拟,为手术提供了实时导航和精确定位,显著提高了手术效率<sup>[15-16]</sup>。AI 还涉及手术成本预测和术后康复,通过马尔可夫模型等方法,为医疗决策提供了有力的数据支持<sup>[17]</sup>。

本综述表明,AI 技术在 THA 中的应用前景广

阔。随着深度学习技术的不断进步,医疗影像分析正逐步实现自动化和智能化。未来的研究将进一步探索 AI 技术的潜力,确保其在临床实践中的安全、有效应用。

## 1 AI 方法的研究进展

### 1.1 医疗影像与自然影像的对比分析

医疗影像与基于可见光成像技术的自然影像在多个方面存在显著差异,主要体现在以下 6 个关键点:

(1) 成像模态的多样性。医疗影像涉及多种成像技术,包括 X 线、计算机断层 (computed tomography, CT) 扫描、核磁共振 (magnetic resonance imaging, MRI) 和超声等;此外,还包括如眼底视网膜图像等 RGB 图像。每种成像模态侧重提供不同的生物信息。例如,X 线在骨骼结构的可视化方面具有优势,CT 能够揭示组织和器官的出血情况,而 MRI 则更适合于软组织的观察。不同型号成像装置所得到的成像结果也存在着一定的差别。

(2) 像素值范围的差异。医疗影像的像素值范围和普通 RGB 图像 (通常在 0~255 之间) 有显著不同。CT 图像的像素值往往高达数千,X 线图像则以浮点型数据表示。

(3) 噪声特性。自然图像中的噪声通常被认为是均匀分布的高斯噪声。然而,在医疗影像中,由于光源的单一性、探测手段的差异以及人体厚度的影响,噪声分布往往不均匀。这要求在图像降噪处理中不能简单应用常规方法,而需要针对具体情况细致的考量。

(4) 伪影问题。三维重建的医疗影像常常伴随着伪影,这是由成像设备和成像原理所导致的。尽管无法完全消除,但可以通过优化技术尽量减少其影响。在设计深度学习网络时,应充分考虑这些成像特性。

(5) 语义与结构的固定性。医疗影像的语义内容相对简单,结构也更为固定。针对特定病例,通常只对特定部位进行成像,而非全身。例如,脑部成像通常使用脑 CT 或脑 MRI,胸部检查则使用

胸部 CT, 髋关节部位的观察则需要髋部 CT。

(6) 数据量的局限性。由于医疗影像只能来源于实际病患,且出于医学伦理的考虑,不能人为制造病例以收集图像数据。这导致可用的数据量可能非常有限,有时甚至不足百例。在这种情况下,设计神经网络时需要特别注意避免过拟合。

## 1.2 医疗影像分割

下躯干 3D CT 扫描图像中,利用医疗影像分割可以提取髋关节以及病灶的具体位置,利用医疗影像配准可以定位、引导外科手术。最常用的 AI 方法是 CNN 和 U-Net 神经网络,近两年基于 Transformer 的研究也有新的进展。

**1.2.1 CNN 应用与进展** 卷积神经网络的深度增加已被证明能显著提升分类任务的准确性,并在泛化能力上展现出优越的表现<sup>[2]</sup>。在三维医疗影像数据的分割中,三维卷积核的应用能够充分利用 CT 图像的三维结构,从而实现更精确的分割<sup>[3]</sup>。尽管现有的医疗影像分割大多集中在软组织和主要器官的分割上,但针对手部、髋部骨骼的分割也取得了令人满意的结果。通过结合全卷积网络 (fully convolutional network, FCN) 和递归神经网络 (recurrent neural network, RNN),整合二维切片的上下文信息,可以有效捕获 z 轴方向信息,进而实现三维上下文的利用<sup>[4]</sup>。此外,基于区域提议网络 (region proposal network, RPN) 优化的完全卷积网络 (faster R-CNN),在分割任务的准确性和处理速度上都有提升<sup>[18]</sup>。

**1.2.2 多模态信息融合** 基于医疗影像多模态的特点,Tseng 等<sup>[19]</sup>提出一种利用卷积长短期记忆网络 (convolutional neural network with long short-term memory, CNN-LSTM) 对连续二维切片进行建模的方法,以实现三维影像的分割。这种方法能更好地处理数据的长期依赖性,对于需要实时应用的医疗影像分割尤为重要。Chaurasia 等<sup>[20]</sup>提出了 Link-Net,能够在不显著增加参数数量的情况下进行高效学习,优化了空间和时间资源的利用。而针对医疗影像数据量小的问题,Unberath 等<sup>[21]</sup>提出基于三维 CT 模拟 X 射线图像代替真实临床放射图,一旦引入到临床实践中,基于学习的算法可以分析术中图像,自动提取语义或上下文信息,例如测量感兴趣的物体,从而通过简化手术流程,潜在地极大改善

现有的护理水平。

**1.2.3 U-Net 及其变体** U-Net 自 2015 年首次发布以来,已成为医疗影像语义分割任务的重要参考模型<sup>[5]</sup>。其对称的 U 形结构、层级间的跳跃链接保留了不同层级的信息。这种设计考虑到了器官结构的固定性和语义信息的丰富性,使得高级语义信息和低级特征都能得到充分利用。

U-Net 网络可以引入残差网络来提升分割效果,也可以通过密集连接机制、多尺度机制、集成机制等进行改进<sup>[22]</sup>。在髋关节影像分割领域,这些改进策略不仅提高了 U-Net 在髋关节影像分割任务中的性能,也为其他医学图像分割任务提供了有价值的参考。

**1.2.4 Transformer 模型引入** 医疗影像的最终目的是辅助临床诊疗,对于神经网络给出的分类、分割等结果,医生要进一步了解病灶在哪一层、能否分割和求体积等,需要神经网络具有可解释性。基于自注意力机制 (self-attention) 的 Transformer 体系结构,可以保留对影像中远程依存关系的认识,为医疗影像分析提供了新的视角。Valanarasu<sup>[6]</sup>提出的 Gated Axial-Attention 模型,通过引入门控轴向控制机制和局部-全局训练策略,不仅在性能上超越了传统的卷积神经网络,还有效应对了医疗影像数据量小的挑战。

**1.2.5 结合 Transformer 和 U-Net 的优势** 许多研究者提出结合 Transformer 和 U-Net 二者优势的模型。例如,基于纯 Transformer 的 U-Net 样式的 Swin-Unet 优于全卷积方法或 Transformer 和卷积结合的方法<sup>[9]</sup>。此外,多复合 Transformer (MCTrans) 可以轻松的地集成到类似 U-Net 的网络中<sup>[8]</sup>,展现出的性能优于早期进行类似尝试的 TransUNet<sup>[7]</sup>。还有如 UNETR<sup>[10]</sup> 和 UTrans<sup>[23]</sup> 等模型,在脑肿瘤和脾脏分割任务中表现优异,且在无需预训练的情况下降低了模型复杂度。

## 1.3 医疗影像配准

医疗影像配准技术涉及将不同时间或不同成像模式获取的人体图像进行空间对齐。2D/3D 配准技术的应用,使医生能够准确估计 3D 结构与二维图像之间的空间关系,这对术前规划和术中导航至关重要<sup>[24]</sup>。无监督配准算法,作为新兴的研究方向,因其减少对标记数据依赖而在医疗影像配准领

域引起了广泛关注<sup>[25]</sup>。此外,将传统配准方法和基于深度学习的配准方法结合,会极大促进配准成为可靠、精确切易于使用的研究和实践中不可或缺的组件。

Miao 等<sup>[26]</sup>提出的基于 FCN 的方法,在马尔科夫决策过程(Markov decision process, MDP)中观察局部区域并执行配准,在图像具有严重伪影和遮挡的情况下表现出色。目前也有使用术中 X 线方法估计髋关节姿态的研究,相关研究大多需要采用注射标记物(荧光或金属球体等)的方法来辅助姿态判断。Grupp 等<sup>[15]</sup>提出一种无需标记物的方法定位髋臼碎片的配准方法,展示了在术中应用的巨大潜力。这种方法的优势是无需使用特殊设备就能实现配准和手术引导,与标准的外科工作流程几乎没有偏差,可以提高手术效率。

之后,Grupp 等<sup>[27]</sup>提出通过在骨盆中注射两个金属球体定位的方法,使用确定骨片的相对姿势,所有骨片的姿势都可以使用单视角的方法在几秒内自动计算得出,准确率得到提高。Grupp 等<sup>[28]</sup>还提出了一种使用神经网络产生的解剖注释以及荧光透视影像进行全自动配准的方法。在下躯干 3D CT 扫描中,运用 CNN 神经网络经过训练,可以同时分割解剖结构并在荧光透视中识别定位标记。使用骨盆和股骨的计算密集型、术中不兼容的 2D/3D 配准获得训练数据,通过投影 3D 注释建立 2D 分割标签和解剖标志位置。术中配准将传统的基于强度的策略与网络推断的注释相结合,不需要人工协助。

#### 1.4 大模型在医疗领域的应用

近年来,以 ChatGPT 为代表的大模型引起了广泛关注。这些模型通过深度学习技术,能够解析文本和图像,并根据特定需求生成相应的文本、图片。在医学领域,Google Research 和 DeepMind 团队发布了 Med-PaLM-2 医学大模型,已经通过美国医师执照考试<sup>[29-30]</sup>。该模型可直接分析 CT 等医疗影像,进行初步诊断、分割病灶、提供医疗建议等。目前,随着模型迭代至第 2 个版本,其在 THA 等专业医疗问题上的解答能力得到显著提升。

在医疗领域,AI 系统适合作为辅助工具或者在人工监督下半自动完成某些任务。需要开展更多的工作,确保在实践中安全、负责任和有效地将其

应用于患者护理。

## 2 AI 方法在 THA 中的应用

### 2.1 术前诊断

AI 在术前诊断中的应用主要体现在通过深度学习技术分析 CT 影像,以识别髋部病变和骨性结构的改变。例如,Xu 等<sup>[31]</sup>开发的基于多任务沙漏网络的模型能够在诊断髋关节发育不良(developmental dysplasia of the hip, DDH)时,同时预测 X 线图像中标志点的位置和股骨头的发育年龄。这有助于在线诊断、克服医疗资源短缺的问题。

在生物医学工程领域,有限元分析已成为模拟手术过程中不可或缺的一部分。通过对髋关节等关键部位进行精确的有限元模拟,可以深入理解不同材料属性对假体性能的影响<sup>[13]</sup>。通过对假体进行细致的有限元分析和生物力学评估,可以得出最合适的假体设计以及最佳的安置角度<sup>[14]</sup>。这不仅确保了术后病人能够恢复到正常的活动水平,而且最大限度地减少了术后并发症的风险,为患者提供了更加安全有效的治疗方案。

### 2.2 术前规划

髋部病变主要表现为骨性结构的改变,其 CT 影像特征明显。THA 术前,通过深度学习技术能够稳定识别解剖位点,匹配所需假体型号,有望实现术前高效规划,解决现阶段术前规划效率低、不准确的问题,也可以降低 THA 术后并发症的发生概率,提高手术效果。

Belzunce 等<sup>[32]</sup>强调了通过 THA 术前和术后的 CT 扫描数据对比,评估股骨头定位和方向对手术结果的影响。对比结果体现了手术规划的重要性,以及如何通过术前规划来提高植入物的功能性和使用寿命。

此外,中国人民解放军总医院第一医学中心骨科开发的 G-NET 神经网络,通过 dense block 结构提高分割精度,针对不同的疾病单独训练神经网络,实现了精准的术前规划<sup>[11]</sup>。同时,该医院对国内常见的 THA 髋臼杯、球头、内胆和股骨柄等进行反向工程,将其转化为三维模型,构建了一个假体资料库,有助于针对患者进行个性化医疗。

### 2.3 个性化医疗

在导入患者的医疗图像后,AIHIP 系统可以对

髌臼和股骨头进行智能分割。系统自动测算骨盆矫正参数和相应解剖学特征,确定髌臼的旋转中心以及臼杯尺寸。此外,系统智能测算髌臼及股骨头假体的最佳位置,并在软件上模拟自动放置。完成规划后,系统还可以模拟髌关节前屈、后伸、外展、内收等运动状态。

霍佳邦等<sup>[12]</sup>通过髌关节 CT 数据验证了三维手术规划在预测适合患者特定假体型号和截骨位置的准确性,与使用传统胶片模板测量方法相比,三维手术规划显示出相近甚至更好的效果,表明 AI 在 THA 的术前规划中具有广阔的应用潜力。

#### 2.4 术中引导

使用 AI 方法预测 THA 所需的假体尺寸和植入角度,不仅能够加快诊断流程,还能节约手术耗材。张润泽等<sup>[33]</sup>研究表明,个性化 3D 打印钛合金短柄股骨假体在力学性能上与目前临床广泛使用的股骨假体相当,显示出良好的力学稳定性。展望未来,结合 AI 术前规划与个性化股骨假体的 3D 打印技术,有望进一步提升手术效果。

AI 在术中引导方面的应用,包括使用 AIHIP 系统对髌臼和股骨头进行智能分割,自动测算骨盆矫正和解剖参数,以及模拟髌关节的运动状态。Grupp 等<sup>[15]</sup>提出的无标记物方法定位髌臼碎片,展示了 AI 在提高手术效率和减少对特殊设备需求方面的潜力。

#### 2.5 手术成本预测和术后康复

在疾病治疗领域,评估干预措施不仅需关注其临床效果和安全性,还需分析其成本效益,以确保有限的医疗资源得到最优化的利用。对于接受相同手术的患者,他们在疾病发展的不同阶段(包括无效、起效、好转至痊愈)所面临的医疗花费会随时间变化,并遵循一定的概率分布。这个过程可以被视为一个随机过程,故可通过马尔可夫模型的概率方法进行有效预测。

马尔可夫模型在医学干预措施成本效用分析中扮演着关键角色,其核心在于确定马尔可夫状态、状态间的转移概率以及各状态的效用值。在状态转移概率达到“稳态”,即术后死亡率和再次手术率相对稳定或变化不大时,该模型的预测结果与现有的医学理论和临床实践高度一致。因此,应用离散马尔可夫过程来预测医学干预措施成本效用不

仅可行,而且对指导实际工作具有重要价值<sup>[17]</sup>。

### 3 结论

本文综述了 AI 在 THA 领域的应用,并按研究方向进行分类和描述。研究表明,随着深度学习技术的不断进步,医疗影像分析正逐步从传统的混合方法向完全基于深度学习的策略转变。AI 在这一过程中展现出了巨大的潜力,其效果在多个方面已接近甚至超过传统经典方法。特别是在解决了训练数据集不足的问题后,基于 AI 方法在分割、配准和术前规划等方面的表现有望得到显著提升<sup>[6]</sup>。

在 THA 术中,AI 方法的应用不仅提高了诊断效率,还有助于节约手术耗材并缩短手术时间。深度学习和图像分割技术的集成,使得 AI 方法能够自动分析医疗影像,准确识别髌关节病变,从而加快问题检测和诊断速度。

此外,AI 方法辅助的术前规划,通过提供精确的骨骼结构测量和假体选型,有效降低了手术的不确定性<sup>[12]</sup>。结合机器学习和图像配准技术,AI 方法在手术中的实时导航和定位也展现出了其精确性和安全性<sup>[15]</sup>。智能辅助系统的引入,进一步优化了手术流程,精确选择植入物,并提供实时反馈,节约耗材并缩短了手术时间<sup>[11]</sup>。

目前,医疗影像领域正处于技术转型期,从 U-Net 模型向 Transformer 架构过渡,预示着未来可能在医疗影像领域实现新的突破。AI 方法的应用不仅限于医疗图像分割和配准,其在辅助诊断、术中引导、手术成本预测以及术后康复等方面同样展现出广阔的应用前景。

随着技术的不断进步和创新,AI 在 THA 中的应用将不断深化,为患者护理带来革命性的改进。未来的研究需要进一步探索 AI 技术的潜力,确保其在临床实践中安全、有效的应用。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**黄寅殊负责文献回顾、研究设计、数据收集、数据分析以及论文撰写;单浩杰参与研究设计,协助数据解释,并参与论文讨论部分的撰写;于晓巍为研究提供专业知识和理论支持,并参与论文审校。

#### 参考文献:

[1] 刘再毅,石镇维. 医学影像人工智能:进展和未来[J]. 国际

- 医学放射学杂志, 2023, 46(1): 1-5.
- [ 2 ] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J/OL]. arXiv: 1409.1556, <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- [ 3 ] KAYALIBAY B, JENSEN G, VAN DER SMAGT P. CNN-based segmentation of medical imaging data [J/OL]. arXiv preprint arXiv:1701.03056, <https://arxiv.org/abs/1701.03056>.
- [ 4 ] CHEN J, YANG L, ZHANG Y, *et al.* Combining fully convolutional and recurrent neural networks for 3d biomedical image segmentation [J/OL]. arXiv:1609.01006, 2016, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.01006>.
- [ 5 ] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation [J/OL]. arXiv: 1505.04597, 2015, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.
- [ 6 ] VALANARASU JMJ, OZA P, HACIHALILOGLU I, *et al.* Medical transformer: Gated axial-attention for medical image segmentation [J/OL]. arXiv: 2102.10662, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.10662>.
- [ 7 ] CHEN J, LU Y, YU Q, *et al.* Transunet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation [J/OL]. arXiv:2102.04306, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.04306>.
- [ 8 ] JI Y, ZHANG R, WANG H, *et al.* Multi-compound transformer for accurate biomedical image segmentation [J/OL]. arXiv: 2106.14385, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.14385>.
- [ 9 ] CAO H, WANG Y, CHEN J, *et al.* Swin-unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation[J/OL]. arXiv:2105.05537, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05537>.
- [ 10 ] HATAMIZADEH A, TANG Y, NATH V, *et al.* Unetr: Transformers for 3D medical image segmentation [J/OL]. arXiv:2103.10504, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.10504>.
- [ 11 ] 吴东, 刘星宇, 张逸凌, 等. 人工智能辅助全髋关节置换术三维规划系统的研发及临床应用研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34(9): 1077-1084.
- [ 12 ] 霍佳邦, 赵畅, 黄广鑫, 等. CT数据三维规划预测全髋关节置换假体型号及截骨的准确性与可复性[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(27): 4294-4299.
- [ 13 ] 郭苏童, 冯德宏, 郭宇, 等. 不同材料赋值属性下髋关节有限元分析[J]. 医用生物力学, 2023, 38(6): 1186-1191.
- [ 14 ] GUO ST, FENG DH, GUO Y, *et al.* Finite Element analysis on the hip with different material assignment properties [J]. J Med Biomech, 2023, 38(6): 1186-1191.
- [ 15 ] BAO SL, XU P, LU N, *et al.* Stress distributions of hip cartilage during gait cycle and its effects in curved periacetabular osteotomy [J]. J Med Biomech, 2022, 37(4): 612-617.
- [ 16 ] GRUPP RB, HEGEMAN RA, MURPHY RJ, *et al.* Pose estimation of periacetabular osteotomy fragments with intraoperative X-ray navigation [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2019, 67(2): 441-452.
- [ 17 ] SHANG P, BAI X, SHI D. Evaluation of acetabular cup placement precision in Stryker computer-assisted navigated total hip arthroplasty [J]. Chin J Med Instrum, 2012, 36(5): 313-316.
- [ 18 ] 巢健茜, 刘沛, 何建敏. 马尔可夫过程在医学干预措施成本效用分析中的应用[J]. 数理统计与管理, 2007, 26(5): 923-927.
- [ 19 ] REN S, HE K, GIRSHICK R, *et al.* Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2016, 39(6): 1137-1149.
- [ 20 ] TSENG KL, LIN YL, HSU W, *et al.* Joint sequence learning and cross-modality convolution for 3D biomedical segmentation [J/OL]. arXiv:1704.07754, 2017, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.07754>.
- [ 21 ] CHAURASIA A, CULURCIELLO E. Linknet: Exploiting encoder representations for efficient semantic segmentation[J/OL]. arXiv:1707.03718, 2017, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.03718>.
- [ 22 ] UNBERATH M, ZAECH JN, GAO C, *et al.* Enabling machine learning in X-ray-based procedures via realistic simulation of image formation [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2019(14): 1517-1528.
- [ 23 ] 张欢, 仇大伟, 冯毅博, 等. U-Net模型改进及其在医学图像分割上的研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 55-71.
- [ 24 ] GAO Y, ZHOU M, METAXAS DN. UTNet: A hybrid transformer architecture for medical image segmentation [J/OL]. arXiv: 2107.00781, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.00781>.
- [ 25 ] UNBERATH M, GAO C, HU Y, *et al.* The impact of machine learning on 2D/3D registration for image-guided interventions: A systematic review and perspective [J]. Front Robot AI, 2021(8): 716007.
- [ 26 ] 马露凡, 罗凤, 严江鹏, 等. 深度医疗影像配准研究进展: 迈向无监督学习[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(9): 2037-2057.
- [ 27 ] MIAO S, PIAT S, FISCHER P, *et al.* Dilated FCN for multi-agent 2D/3D medical image registration [J/OL]. arXiv:1712.01651, 2018, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.01651>.

- 1712.01651.
- [27] GRUPP RB, MURPHY RJ, HEGEMAN RA, *et al.* Fast and automatic periacetabular osteotomy fragment pose estimation using intraoperatively implanted fiducials and single-view fluoroscopy [J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65 (24): 245019.
- [28] GRUPP RB, UNBERATH M, GAO C, *et al.* Automatic annotation of hip anatomy in fluoroscopy for robust and efficient 2D/3D registration [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020(15): 759-769.
- [29] SINGHAL K, TU T, GOTTWEIS J, *et al.* Towards expert-level medical question answering with large language models [J/OL]. arXiv:2305.09617, <https://arxiv.org/abs/2305.09617>.
- [30] TU T, AZIZI S, DRIESS D, *et al.* Towards generalist biomedical AI [J]. *NEJM AI*, 2024, 1(3): A1oa2300138.
- [31] XU J, XIE H, TAN Q, *et al.* Multi-task hourglass network for online automatic diagnosis of developmental dysplasia of the hip [J]. *World Wide Web*, 2023, 26(2): 539-559.
- [32] BELZUNCE MA, HENCKEL J, DI LAURA A, *et al.* Uncemented femoral stem orientation and position in total hip arthroplasty: A CT study [J]. *J Orthop Res*, 2020, 38 (7): 1486-1496.
- [33] 张润泽, 刘宏伟, 张文, 等. 个性化 3D 打印钛合金短柄股骨头假体的生物力学评价[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1064-1069.
- ZHANG RZ, LIU HW, ZHANG W, *et al.* Biomechanical evaluation of individualized 3D printed titanium alloy short femoral stem prosthesis [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37 (6): 1064-1069.